



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Laboratoire de Structures

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Construction Mécanique

Titre

**Optimisation d'un réservoir sous pression type IV
en matériaux composites**

Proposé et encadré par :

Dr. R. Tiberkak

Réalisé par :

Fenniche loubna
Stambouli chahrazed

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous remercions DIEU tout puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous adressons notre vif remerciement à notre encadreur Dr. TIBERKAK, pour sa compréhension et ses conseils et son aide. Pour sa gentillesse et ses orientations efficaces.

Nous remercions Dr GUERGADJ et Dr LOUNICI Pour leurs conseils. Leur présence va valoriser, de manière certaine, le travail que nous avons effectué.

Nous adressons également notre profonde gratitude à tous les professeurs de l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 1 en particulier ceux du département GENIE MECANIQUE. Votre enseignement a porté ses fruits.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au succès de ce travail.

Merci a tous...

Loubna et Chahrazed.

Dédicace

Grâce à dieu tout puissant, nous dédions ce modeste travail à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail plus particulièrement :

- ✚ A Mes très chers parents, tous mes respects et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie, et je leur souhaite la bonne santé et que Dieu me les protégé.
- ✚ A ma sœur Radia, et mon frère Refik,
- ✚ A mon fiancé Hassen.
- ✚ A tous nos enseignants et à notre promotion.
- ✚ A tous mes chères amies Yesmine, Maria, Houda, Razika et bien sûr Loubna et Meriem.
- ✚ En fin, à tous ceux que je n'ai pu citer qui m'aime et me connaissent, et à ceux qui ont contribué à notre formation.

Merci...

Chahrazed

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail du fond du cœur :

A mes précieux parents,

*Ma mère : Ghania et mon père : Zine d'inne qui m'ont aidés
durant toute ma vie à qui je souhaite une longue vie*

Mes frère abdou islam rabañ et ma sœur nessema

A mes grands-parents

et toute ma famille

Mes cousines : nafissa meriéme fati aya sara

*Ames meilleure : katia asma meriem razika maria
chahrazed khouloud sara zinbe*

LOUBNA



Sommaire

<u>Introduction générale</u>	02
------------------------------------	----

Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

1.1. Introduction	04
1.2. Définition	04
1.3. Constituants des matériaux composites	04
1.3.1. Renforts	05
1.3.1.1. Différents types de renfort	06
1.3.1.2. Caractéristiques mécaniques des fibres	07
1.3.2. Matrice	09
1.3.3. Les charges	11
1.3.4. Les additifs	12
1.3.5. L'interface	12
1.4. Architecture des matériaux composites	12
1.4.1. Les monocouches	12
1.4.2. Les stratifiés	13
1.4.3- Composites sandwichs	17

Chapitre 2 : Généralités sur les réservoirs

2.1. Introduction	19
2.2. Définition d'un réservoir de stockage	20
2.3. Types des réservoirs de stockage	20
2.3.1. Réservoirs à toit fixe	20
2.3.2. Réservoirs à toit flottant	21
2.3.3. Réservoirs horizontales	24

2.3.4. Réservoirs sous pression	25
---------------------------------------	----

Chapitre 3 : Réservoir de type IV

3.1 Introduction	28
3.2. L'hydrogène	29
3.3. Réservoirs de type IV	29
3.3.1. Conception des réservoirs en composites	29
3.3.2. Architecture d'un réservoir type IV	30
3.3.3. Réservoir type IV en composite	31
3.3.3.1. Les matériaux composites utilisés	31
3.3.3.2. Enroulement filamentaire	32
3.3.4. Fabrication du Réservoir type IV en composite	33
3.3.4.1. Description du procédé de fabrication	34
3.3.4.2. Contrôle de réservoir fabriqué	35

Chapitre 4: Modélisations et simulations

4.1. Introduction	37
4.2. Logiciel utilisé	37
4.3 Conception du modèle.....	38
4.3.1 Liner	38
4.3.2 Embase	41
4.3.3 Coque composite	44
4.3.4 L'assemblage.....	46
4.4 Simulation	46
4.4.1 L'influence de nombre de plis.....	46
4.4.2 L'influence des séquences d'empilement	56
4.4.3 L'influence des matériaux composites.....	60
4.4.4 Stratifié hybride.....	62

4.5 Conclusion	64
Conclusion générale.....	65
Référence Bibliographique.....	66

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

Tableau 1.1: Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone	07
Tableau 1.2: Propriétés mécaniques des fibres	9
Tableau 1.3: Caractéristiques des résines thermodurcissables	10
Tableau 1.4: Caractéristiques des résines thermoplastiques	10
Tableau 1.5: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques	11

Chapitre 3 : Réservoir de type IV

Tableau 3.1 : Propriétés de la fibre de carbone T700SC	32
Tableau 3.2 : Propriétés de la résine époxy UF3369	32

Chapitre 4: Modélisations et simulations

Tableau (4.1) : stratifiés étudiés	47
Tableau (4.2) : déplacements, déformations et contraintes dans les trois stratifié	55
Tableau (4.3) : séquences d'empilements	56
Tableau (4.4) : Résultats des trois séquences	59
Tableau (4.5) : les deux matériaux utilisés	60
Tableau (4.6) : deux matériaux	62
Tableau (4.7) : stratifié hybride	64

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

Figure (1.1) : matériaux composites	05
Figure (1.2) : Différentes familles du renfort	05
Figure (1.3) : Exemples de fibres de verre	06
Figure (1.4) : Exemples de fibres de carbone	07
Figure (1.5) : Exemples de fibres d'aramide	08
Figure (1.6) : Différentes familles de matrice	09
Figure (1.7) : composite monocouche	13
Figure (1.8) : composite stratifié	13
Figure (1.9) : Stratifié constitué de couches parfaitement liées	14
Figure (1.10) : Désignations du stratifié	15
Figure (1.11) : Exemple de stratifié symétrique	16
Figure (1.12) : Exemple de stratifié symétrique	16
Figure (1.13) : Matériaux sandwiches à âmes pleines	17
Figure (1.14) : Matériaux sandwiches à âmes creuses	18

Chapitre2 : Généralité sur les réservoirs

Figure (2.1) : Réservoirs à toit fixe	21
Figure (2.2) : Réservoirs à toit flottant externe	22
Figure (2.3) : Réservoirs à toit flottant interne.....	23
Figure (2.4) : Réservoirs aérien horizontal liquide	24
Figure (2.5) : réservoirs type I.....	25
Figure (2.6) : réservoirs type II	25
Figure (2.7) : réservoirs type III	25

Figure (2.8) : réservoirs bobinés type IV	26
Figure (2.9) : Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé	26

Chapitre 3 : Réservoir de type IV

Figure (3.1) : Schéma des composants d'un réservoir de type IV	30
Figure (3.2) : Procédé de fabrication des réservoirs composites par enroulement filamentaire	33
Figure (3.3): Différents types de dépose de la nappe par enroulement filamentaire	33
Figure (3.4) : Schéma décrivant le procédé de rotomoulage réactif	34
Figure (3.5) : plan du liner.....	34
Figure (3.6) : plan d'une embase.....	34
Figure 3.7 : Cycle de polymérisation du réservoir	35

Chapitre 4: Modélisations et simulations

Figure (4.1) : Dessin initial de liner	38
Figure (4.2) : La symétrie	39
Figure (4.3) : Etapes pour obtenir un volume de liner.	39
Figure (4.4) : Propriétés mécaniques de liner polymère PA	40
Figure (4.5) : Liner polymère PA6 finale.....	41
Figure (4.6) : Dessin initial de l'embase	41
Figure (4.7) : Les étapes pour obtenir un volume de l'embase	42
Figure (4.8): Propriétés mécaniques des aciers inoxydables AISI 316 (X2CrNiMo 17-12-2) ..	43
Figure (4.9) : l'embase (X2CrNiMo 17-12-2) finale	43
Figure (4.10) : Dessin initial de coque composite.	44
Figure (4.11) : Etapes pour la symétrie de dessin	44
Figure (4.12) : Etapes pour obtenir un volume.	45

Figure (4.13) : Coque en composite (Carbone /Epoxy)	45
Figure (4.14) : Schéma de présentation de l'étude	46
Figure (4.15) : Résultat de contraintes de Von Mises	47
Figure (4.16) : Résultat de déformations	48
Figure (4.17) : Résultat de déplacements	48
Figure (4.18) : Résultat de contraintes de Von Mises	49
Figure (4.19) : Résultat de déformations	49
Figure (4.20) : Résultat de déplacements	50
Figure (4.21) : Résultat de contraintes Von Mises	50
Figure (4.22) : Résultat de déformations	51
Figure (4.23) : Résultat de déplacements	51
Figure (4.24) : Résultat de contraintes Von Mises	52
Figure (4.25) : Résultat de déformations	52
Figure (4.26) : Résultat de déplacements	53
Figure (4.27) : Résultat de contraintes Von Mises	53
Figure (4.28) : Résultat de déformations	54
Figure (4.29) : résultat de déplacements	54
Figure (4.30) : Résultat de contraintes Von Mises.	56
Figure (4.31) : Résultat de déformations	57
Figure (4.32) : Résultat de déplacements	57
Figure (4.33) : Résultat de contraintes de Von Mises	58
Figure (4.34) : Résultats de déformations	58
Figure (4.35) : Résultat de déplacements	59
Figure (4.36) : Résultat de contraintes Von Mises.	60
Figure (4.37) : Résultat de déformations	61
Figure (4.38) : Résultat de déplacements	61
Figure (4.39) : Résultat de contraintes de Von Mises	62

Figure (4.40) : Résultats de déformations	63
Figure (4.41) : Résultat de déplacements	63

ملخص

يتكون هذا العمل من تحديد الخواص الميكانيكية (الضغط، الإزاحة والتشوهات) لخزان الضغط من النوع الرابع في المواد المركبة. ثم إجراء فحص لمعرفة تأثير المواد المركبة واتجاه الالياف وعدد الطيات على سلوك هذا الخزان .

كلمات

المواد المركبة، النوع الرابع وعاء الضغط، الخصائص الميكانيكية.

Résumé

Ce travail consiste a déterminé les caractéristiques mécaniques (contrainte, déplacement et déformation) d'un réservoir sous pression type IV en matériaux composite. Une vérification a été effectué dont le but est de voir l'influence de changement des matériaux, l'orientation des fibres et le nombre de plis, et enfin déterminer la meilleure séquence d'empilement.

Les mots clés

Matériaux composites, réservoir sous pression type IV, caractéristiques mécaniques.

Abstract

This work consists in determining the mechanical characteristic (stress, displacement and deformation) of a pressure tank type IV in composite materials. A check has been made whose purpose is to see the influence of material change, the orientation of the fibers and the number of folds, and finally determines the best stacking sequence.

Keywords

Composite materials, type IV pressure vessel, mechanical characteristic.

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, constitue un vecteur énergétique prometteur dans l'optique de la construction de véhicules propres. L'hydrogène devrait donc jouer dans l'avenir un rôle important dans le cadre du développement durable [1].

La filière hydrogène comprend différentes étapes clés : la production, la distribution, le stockage et l'exploitation. Aujourd'hui, le stockage de ce vecteur reste encore un verrou technologique et scientifique majeur. Il existe différentes stratégies de stockage :

- le stockage d'hydrogène comprimé à haute pression (200, 350 et 700 bar);
- le stockage cryogénique d'hydrogène liquide (-253°C);
- le stockage solide d'hydrogène sous forme d'hydrure;

Parmi ces trois solutions, le stockage gazeux comprimé apparaît comme la solution la plus mature, présentant le meilleur compromis en termes de densité massique (rapport de la masse d'hydrogène stockée sur la masse de l'ensemble) et de densité volumétrique (rapport du volume d'hydrogène stocké sur le volume total) [2].

Des progrès concernant le mode et les pressions de stockage ont été faits en passant de 200 bar à 350 bar dans le cas des bouteilles distribuées dans l'industrie. A présent, les développements se tournent vers des réservoirs pouvant supporter des pressions de 700 bar[1]. mais, aujourd'hui encore, aucune solution « Haute pression » ne satisfait pleinement l'ensemble des spécifications techniques et économiques des industriels. Des progrès sont

donc encore nécessaires pour améliorer les performances et la durabilité des réservoirs. Depuis 1998, le commissariat à l'énergie atomique (CEA) travaille sur le développement des réservoirs de stockage haute pression de type IV (liner polymère renforcé d'une structuration composite). L'identification des paramètres matériaux composite et procédé influents ainsi que des sollicitations susceptibles de modifier les performances et la durabilité des réservoirs doivent être prise en compte [3].

Les matériaux composites à fibres longues sont de plus en plus une vraie alternative aux matériaux métalliques grâce aux propriétés mécaniques spécifiques, l'adaptabilité aux besoins mécaniques de la structure ou de la pièce à fabriquer et leur faible sensibilité aux phénomènes de fatigue. Le domaine d'utilisation des composites est très vaste, puisqu'il s'étend de l'industrie aérospatiale au matériel sportif. C'est pour ces raisons que l'utilisation de ce type de matériau est en pleine croissance depuis nombreuses années.

Une des utilisations des composites à fibre longue en plein essor depuis plusieurs années est la fabrication des structures cylindriques (dont les réservoirs).

Une des applications de ces structures bobinées est la fabrication des réservoirs pour le stockage de gaz à haute pression le CAE travaillé à son développement [4]. Plus particulièrement, dans le cadre de cette thèse, nous étudierons des réservoirs conçus pour le stockage de l'hydrogène à très haute pression et qui feront partie des voitures de l'avenir équipées de piles à combustible.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures.

Le chapitre 2 fait l'objet d'une généralité sur les réservoirs de stockage tels que les différents types, les matériaux de construction, les contenus du réservoir.

Le troisième chapitre est consacré à la description du modèle, conception et architecture d'un réservoir type 4, ainsi que les matériaux composites et la méthode utilisée pour la fabrication

Les modélisations et simulations du réservoir type 4 sont présentés dans le chapitre 4.

En fin on termine ce travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur les matériaux composites

1.1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs. Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite.

L'objectif de premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures. Etant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tout type de composite [5].

1.2. Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice [6].

1.3. Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure [6].

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- ❖ D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- ❖ D'un renfort.
- ❖ D'une interface.

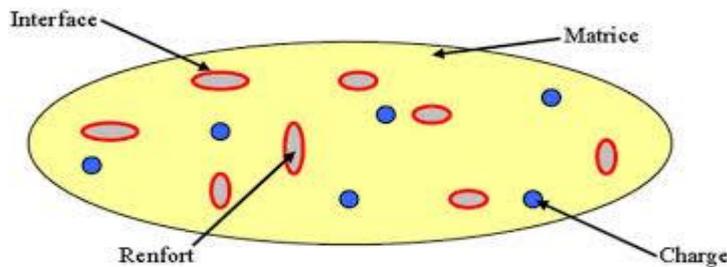


Figure (1.1) : matériaux composites

1.3.1. 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) [7].

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) [8].

- Différentes natures de renfort:

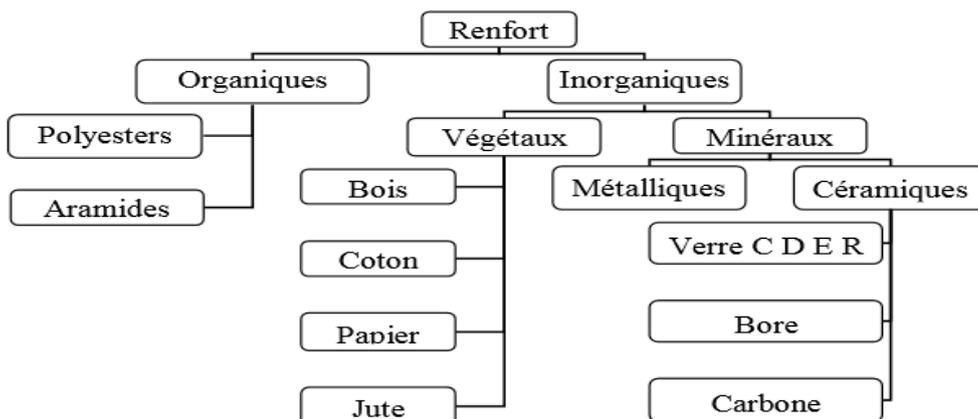


Figure (1.2) : Différentes familles du renfort

1.3.1.1. Différents types de renfort

a. 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 des 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 [6].

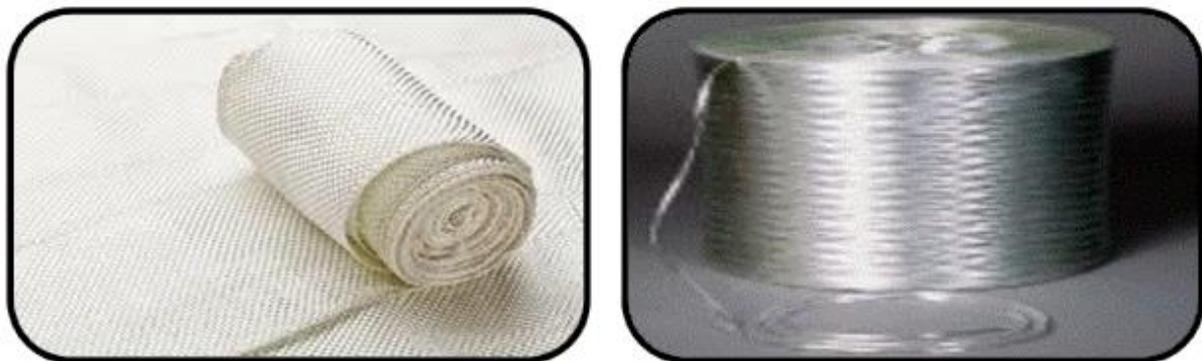


Figure (1.3) : Exemples de fibres de verre

b. 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 de

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 [6].

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 (1.4): 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.

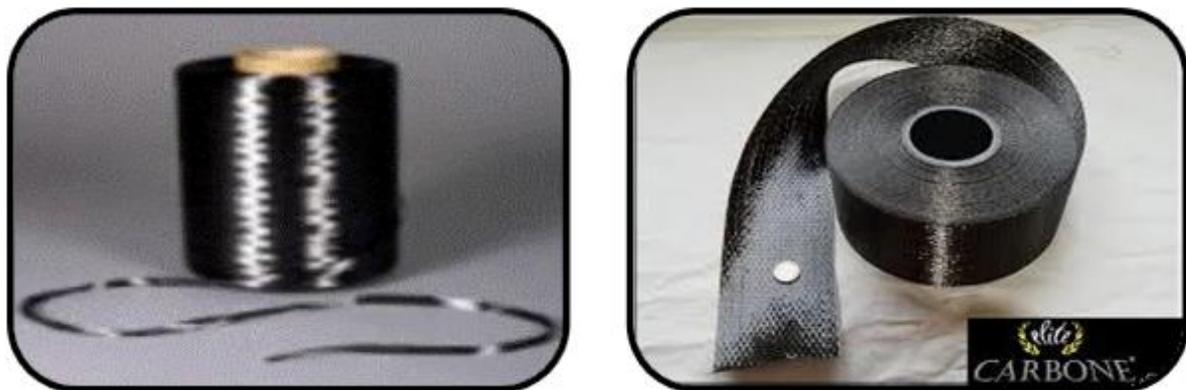


Figure (1.4) : Exemples de fibres de carbone

c. Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonnes 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 utilisé. 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) [8].

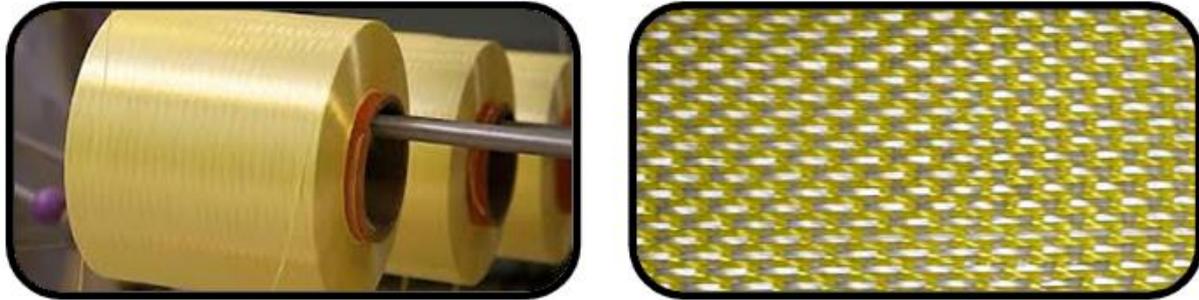


Figure (1.5) : Exemples de fibres d'aramide

d. 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 °C et 2000 °C. 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 [8].

1.3.1.2. 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 [8].

fibre	densité	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E_L (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire μm
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 (1.2): Propriétés mécaniques des fibres

1.3.2. Matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique [6].

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices [7].

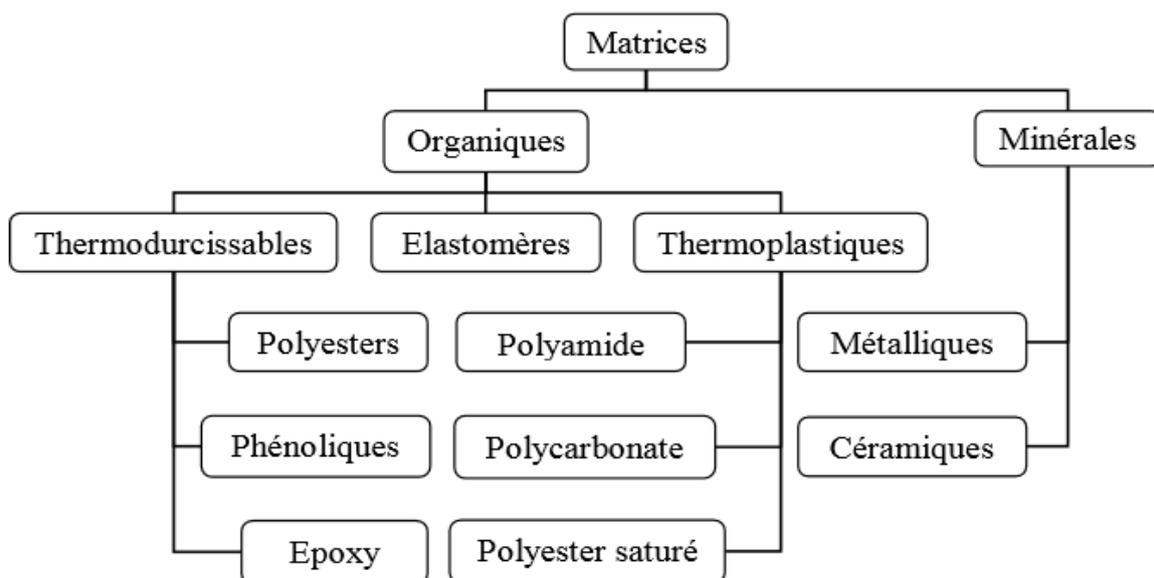


Figure (1.4): Différentes familles de matrice

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

a) 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 polyester insaturées, les résines de Condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables [8].

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau (1.3).

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (Kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_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 (1.3): Caractéristiques des résines thermodurcissables

b) 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 ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau (1.4) [8].

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_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

Tableau (1.4) : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau 1 :

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 (1.5): Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques

c) 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 [6].

d) 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) [6].

e) 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 [6].

1.3.3 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) [7].

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)

1.3.4 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[7].

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.

1.3.5- 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 [7].

1.4. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwiches.

1.4.1. Les monocouches

La composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibres+matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible (≈ 0.125 mm). On distingue, le

pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire) [6].

La superposition de la monocouche dans l'ordre du plan de drapage va constituer le stratifié [5].



Figure (1.5): composite monocouche

1.4.2. Les stratifiés

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation (Figure 1.6). Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite [6].

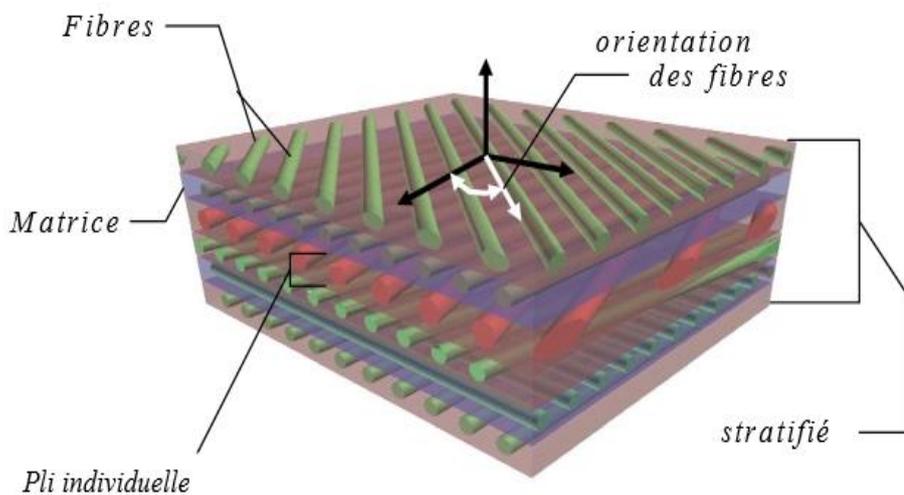


Figure (1.6) : composite stratifié

➤ Structures composites stratifiées

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.

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso constituants, comme illustré sur la figure 1.7, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches) [7].

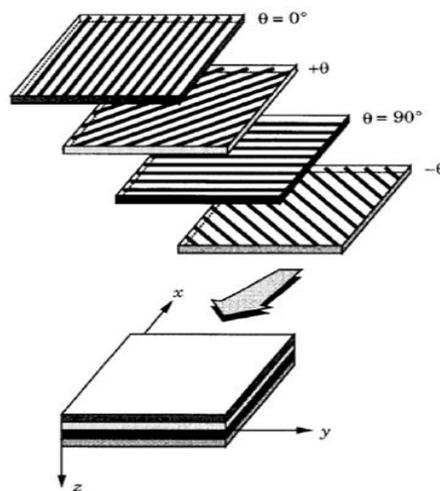


Figure (1.7): Stratifié constitué de couches parfaitement liées

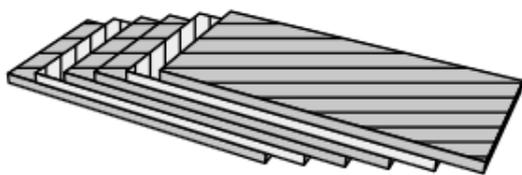
➤ **Désignation des structures stratifiées**

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des

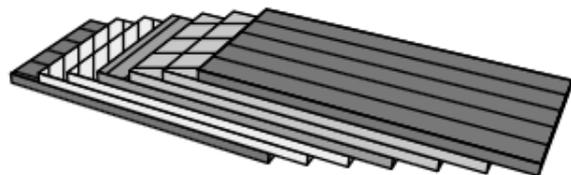
fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les figures 1.8(a) et 1.8(b), les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut;
- les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole «/» comme l'exemple de la figure 1.8(a) : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$;
- les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme l'exemple de la figure 1.8(b) : $[0/45_2/90/-45_2/0]$;
- en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche;
- en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole indique la symétrie : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$ devient $[-45/45/-45]_s$.



(a) $[-45/45/-45/-45/45/-45]$



(b) $[0/45/45/90/-45/-45/0]$

Figure (1.8) : Désignations du stratifié

Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique [9].

Par exemple : $[45/60/80/0]_s$

45°

 60° [45/ 60 / 80 / 0]s

 80°

 0°

 0°

 80°

 60°

 45°

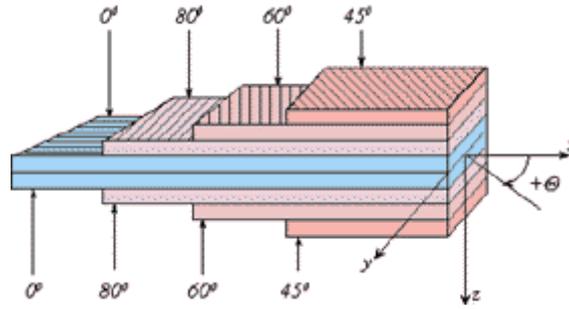


Figure (1.9): Exemple de stratifié symétrique

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. [9]

Par exemple [0 / +45 / -45 / 90]s

0°

 30°

 -45°

 90°

 -45° [0 / +45 / -45 / 90]s

 30°

 0°

 45°

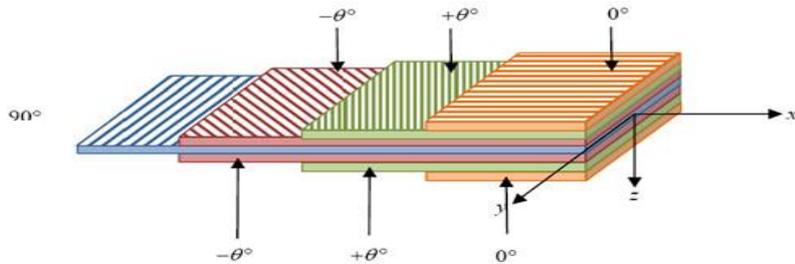


Figure (1.10): Exemple de stratifié symétrique

➤ **Stratifiés hybrides**

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation [9].

Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

0° V

 +45° C

 -45° C

 90° C

 90° C

 -45° C

 +45° C

 0° V

[0v/ ±45c/ 90c]s

avec V : verre, C : carbone

Et permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- des hybrides Inta couches, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des hybrides intra couchés, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents ;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

1.4.3- Composites sandwichs

Le principe du technique sandwich consiste à appliquer sur une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

— pour les âmes pleines (figure 1.11) :

- le balsa ou bois cellulaire ;
- diverses mousses cellulaires ;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques;

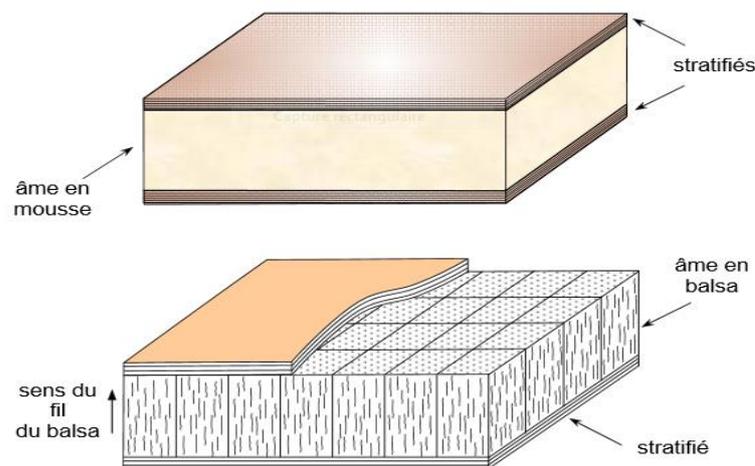


Figure (1.11) : Matériaux sandwichs à âmes pleines

— pour les âmes creuses (figure 1.12), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers ;
- du papier kraft (enduit ou non de résine);

- du papier polyamide, type papier Nomex.

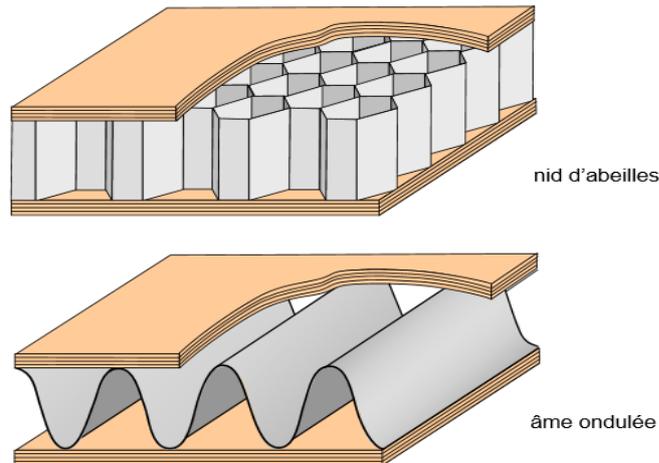


Figure (1.12) : Matériaux sandwichs à âmes creuses

Des âmes mixtes peuvent être utilisées.

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwichs jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence [9].

Chapitre2

Généralités sur les réservoirs

2.1. Introduction

Les réservoirs de stockage ont été largement utilisés dans de nombreux industriels établis en particulier dans l'usine de transformation comme la raffinerie de pétrole et l'industrie pétrochimique. Ils sont utilisés pour stocker une multitude de produits différents. Ils viennent dans une gamme de tailles petite à vraiment gigantesque.

Les réservoirs de stockage à température ambiante constituent la presque totalité des capacités qui forment les parcs de stockage, car, à l'évidence, elles représentent la solution logique et naturelle pour stocker les liquides.

Dans cette situation et en fonction de leur degré de volatilité, aucune pression effective n'existe dans l'enceinte de stockage et on peut alors mettre en œuvre des réservoirs atmosphériques.

Si, au contraire, cette pression de vapeur est supérieure de la pression atmosphérique, la capacité de stockage est soumise à une pression interne. C'est toujours le cas pour les liquides dont la température au point normal d'ébullition est inférieure à la température ambiante. Pour ces produits il est alors nécessaire de s'orienter vers des réservoirs sous pression, étudiés et conçus pour résister à cette contrainte.

Il ya une grande variété de réservoirs de stockage, ils peuvent être construits au dessus du sol, dans le sol et sous-sol. En forme, ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique ou rectangulaire horizontal, vertical cylindrique, mais les cylindriques verticaux sont les plus habituellement utilisés [10].

2.2. Définition d'un réservoir de stockage

Un réservoir de stockage est un récipient, généralement pour contenir des liquides, parfois pour les gaz comprimés (réservoir de gaz sous pression).

2.3. Types des réservoirs de stockage

Les bacs de stockage contenant des liquides et des vapeurs organiques et non organiques peuvent être trouvés dans de nombreuses industries, y compris :

- La production de pétrole et de raffinage ;
- Pétrochimie et fabrication de produits chimiques ;
- Le stockage en vrac, et les opérations de transfert ;
- Autres industries consommant ou produisant des liquides et des vapeurs.

Sept types de réservoirs sont utilisés pour stocker des liquides organiques :

- 1- Réservoirs à toit fixe ;
- 2- Réservoirs à toit flottant externe ;
- 3- Réservoirs à toit flottant interne ;
- 4- Réservoirs à toit flottant externe en forme de dôme ;
- 5- Réservoirs horizontales ;
- 6- Réservoirs sous pression ;
- 7- Réservoirs variables spatiales.

Les quatre premiers types de réservoir sont de forme cylindrique avec l'axe orienté perpendiculairement à la base. Ces réservoirs sont presque exclusivement au-dessus du sol. Les réservoirs horizontaux (c'est à dire avec l'axe parallèle à la base) peuvent être utilisés au-dessus du sol et sous sol.

Les réservoirs sous pression sont souvent orientés horizontalement de forme sphérique pour maintenir l'intégrité structurale à des pressions élevées. Ils sont situés au-dessus du sol. Réservoirs variables spatiales vapeur peut être cylindrique ou de forme sphérique [11].

2.3.1. Réservoirs à toit fixe

Les bacs à toits fixes sont prévus pour le stockage des produits peu volatils et à faible tension de vapeur est réalisé dans des réservoirs dont la partie supérieure est obturée par un toit fixe. Il est ainsi possible d'assurer plus facilement leur conservation et d'empêcher leur contamination par les agents extérieurs. D'une manière générale, il s'agit de produits dont la

tension de vapeur absolue à température ambiante est inférieure à 0,1 bar ou dont le point d'éclair est supérieur à 55°C.

Le fond est réalisé à partir de tôles rectangulaires de 6 à 6,5 mm d'épaisseur minimale, soudées par recouvrement sur leur face supérieure

La robe du bac est constituée d'un empilage vertical de bandes de tôles soudées. Elle est calculée pour résister à la pression latérale (bac plein d'eau) et résister au vent et tremblements de terre.

Les toits sont de forme conique ou sphérique. Ils sont étudiés pour supporter une surcharge externe d'au moins 120 da N/m² correspondant aux effets combinés d'une charge temporaire (neige et dépression interne). La tôlerie de ces toits est réalisée à partir de tôles rectangulaires de 5 mm d'épaisseur, soudées entre elles par recouvrement sur leur face supérieure. La tôlerie est indépendante de la charpente et il n'y a pas de liaison par soudure entre ces deux éléments du toit.

On range les toits fixes en deux catégories, les toits supportés et les toits autoportants avec ou sans charpente [12].

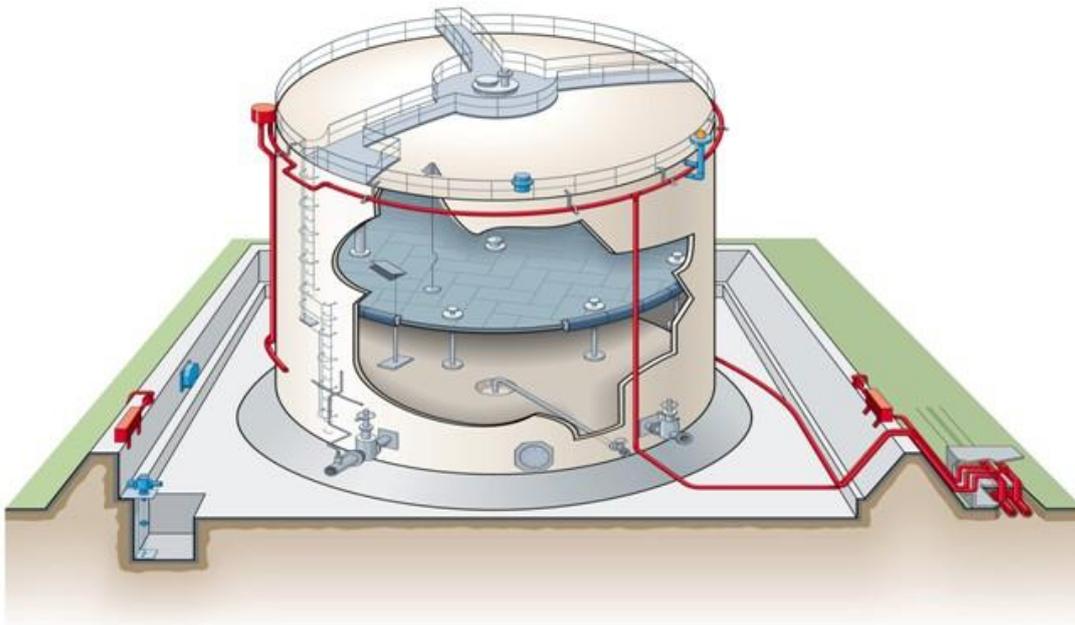


Figure (2.1) : Réservoirs à toit fixe

2.3.2. Réservoirs à toit flottant

Les réservoirs à toit flottant sont principalement utilisés pour le stockage de liquides volatils dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est comprise entre 0,1 et 0,75 bar ou dont le point éclair est inférieur ou égal à 55°C. C'est le cas, par exemple, des

pétroles bruts, des naphthas et des diverses essences et carburants. Le toit flottant est posé directement sur la surface du liquide. L'absence d'espace vapeur permet à ces réservoirs de fonctionner et d'être étudiés sous pression atmosphérique.

Le toit flottant est un disque mobile qui flotte sur le liquide en suivant les mouvements de descente et de montée du produit. Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit de coulisser sans contrainte à l'intérieur de la robe.

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant [12].

A. Réservoirs à toit flottant externe

Les réservoirs à toit flottant externe, dont le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes.

La face inférieure de toit flottant est entièrement mouillée par le liquide sur le quel ils flottent. Aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet d'éliminer les problèmes de corrosion interne, de limiter les risques d'incendie et de pratiquement supprimer les pertes par évaporation. Les deux types principaux de toit flottant à contact actuellement utilisés dans l'industrie, sont simple pont et le double pont.

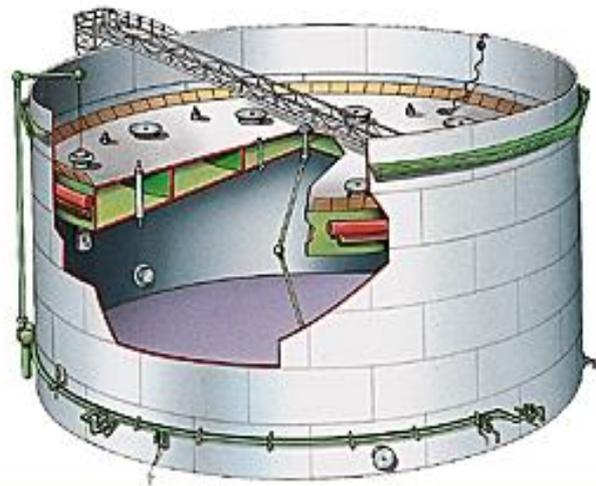


Figure (2.2): Réservoirs à toit flottant externe

Ces toits sont exposés aux intempéries et doivent donc être conçus pour résister aux effets du vent, de la pluie et de la neige. Ils sont dimensionnés pour rester en flottaison sur un liquide de masse volumique au moins égale à 700 kg/m^3 en supportant une charge d'eaux pluviales correspondant à une chute de 250 mm sur une période de 24 h et en supposant que le système de drainage principal est inopérant. Lorsque le toit est au repos sur le fond du réservoir en appui sur ses pieds supports, il doit pouvoir soutenir une surcharge de 120 da N/m^2 sans accumulation d'eau [12].

B. Réservoirs à toit flottant interne

Les réservoirs à toit flottant interne sont des réservoirs à toit fixe, dans lesquels est installé un toit flottant simplifié, également désigné sous l'appellation d'écran flottant.

Le toit fixe peut être soit du type supporté, avec des poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, soit du type autoportant sans poteau. Lorsque la structure comporte des poteaux, ils traversent le toit flottant interne par des puits équipés de joints d'étanchéité. Il est recommandé que

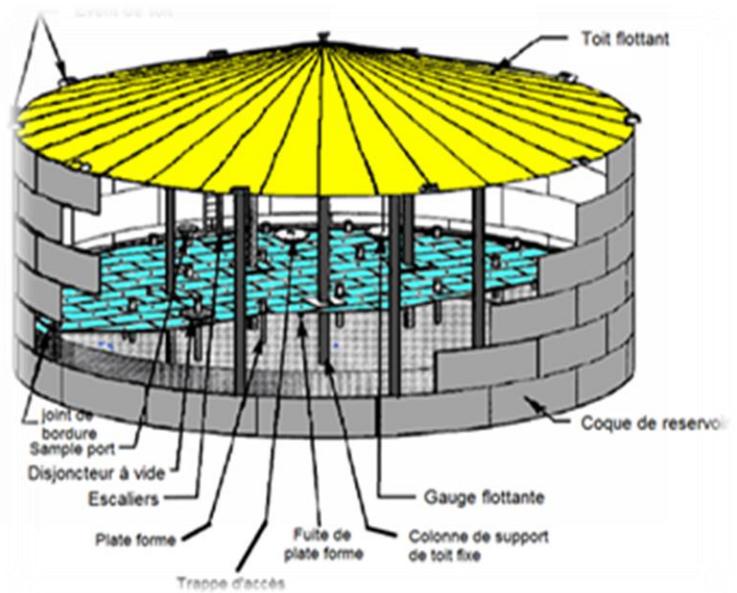


Figure (2.3) : Réservoirs à toit flottant interne

ces poteaux soient de section tubulaire pour faciliter les déplacements du toit et la réalisation de l'étanchéité des puits

Ces toits sont dimensionnés pour flotter sur un liquide ayant une masse volumique au moins égale à 700 kg/m³.

Des événements (dont le nombre et les dimensions sont fixés par le code de construction) sont installés à intervalles réguliers au sommet de la robe ou en périphérie du toit, pour permettre une circulation d'air dans l'espace compris entre l'écran flottant et le toit. Ils empêchent la formation éventuelle d'un mélange air-vapeur inflammable ou dangereux au-dessus du toit flottant [12].

2.3.3. Réservoirs horizontales

Les réservoirs horizontaux sont construits pour le service à la fois en surface et sous terre. Le figure (2.4) représentent des réservoirs horizontaux enterrés et hors sol typiques. Les réservoirs horizontaux sont en général fabriqués en acier, ou bien acier avec un revêtement en fibre de verre, polyester ou en fibre de verre-résine. Les réservoirs horizontaux sont généralement des réservoirs de petit stockage avec une capacité inférieure à 75 710 L (20000 gallons).

Les réservoirs horizontaux sont construits de telle sorte que la longueur de la citerne n'est pas supérieure à six fois le diamètre pour assurer l'intégrité structurale. Les réservoirs

horizontaux sont habituellement munis d'évents de surpression-dépression, trappes de jauge et des puits d'échantillons, et les regards.

Pour permettre l'accessibilité à ces réservoirs. En outre, les réservoirs souterrains peuvent être de protection cathodique contre la corrosion de l'enveloppe du réservoir. La protection cathodique est réalisée en plaçant des anodes dans le réservoir qui sont raccordées à un système à courant imposé ou à l'aide d'anodes galvaniques dans le réservoir. Toutefois, la protection cathodique interne est plus largement utilisée dans l'industrie pétrolière, en raison d'inhibiteurs de corrosion que l'on trouve maintenant dans les produits pétroliers plus raffinés. Les sources d'émissions pour les réservoirs horizontaux hors sol sont les mêmes que pour les réservoirs à toit fixe. Les émissions des réservoirs de stockage souterrains sont principalement associées à des changements dans le niveau du liquide dans le réservoir. Les pertes dues aux changements de température ou de pression barométrique sont peu importantes pour les réservoirs souterrains parce que la terre environnante limite les changements diurnes de température et les variations de la pression barométrique n'entraînerait que de légères pertes [11].

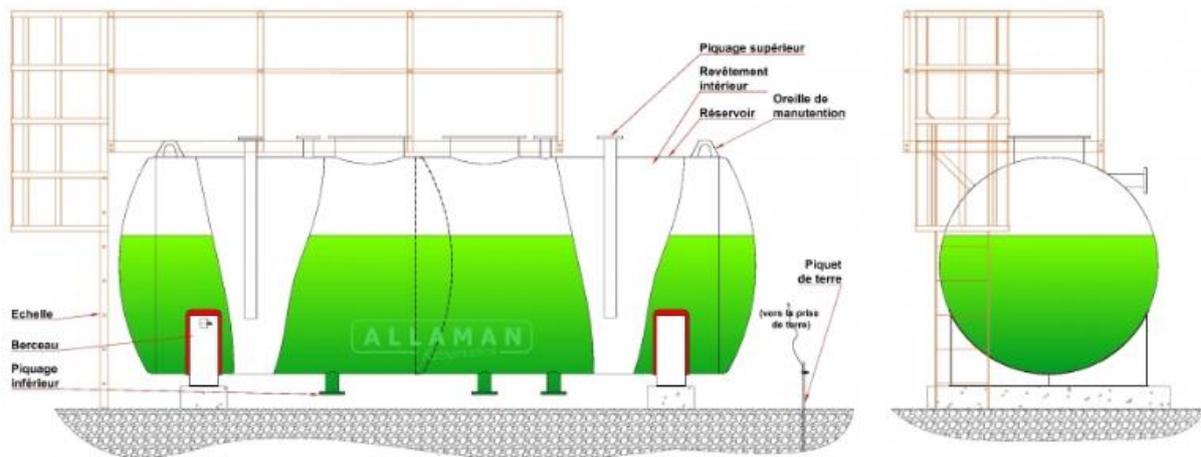


Figure (2.4) : Réservoirs aérien horizontal liquide

2.3.4. Réservoirs sous pression

L'hydrogène à 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 M Pa (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 M Pa 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 M Pa ont été réalisés à titre expérimental [13].

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

❖ **Les réservoirs de « type I »**

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 les de stockage sont limitées à 300 bar [1].

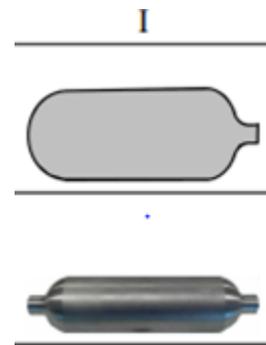


Figure (2.5) : réservoirs type I

❖ **Les réservoirs de « type II »**

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 pression de stockage reste mineure [1].

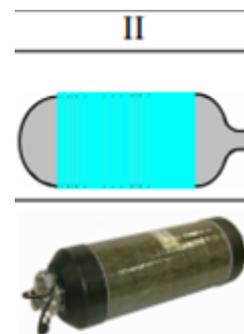


Figure (2.6) : réservoirs type II

❖ **Les réservoirs de « type III »**

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].

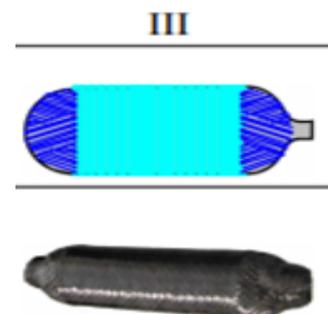


Figure (2.7) : réservoirs type III

❖ **Les réservoirs de « type IV »**

Sont des réservoirs en composites (principalement en fibres de carbone) avec un liner en polymère (thermoplastique ou thermodurcissable). Dans ce cas, le liner ne supporte par 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 (2.8) : 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 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].

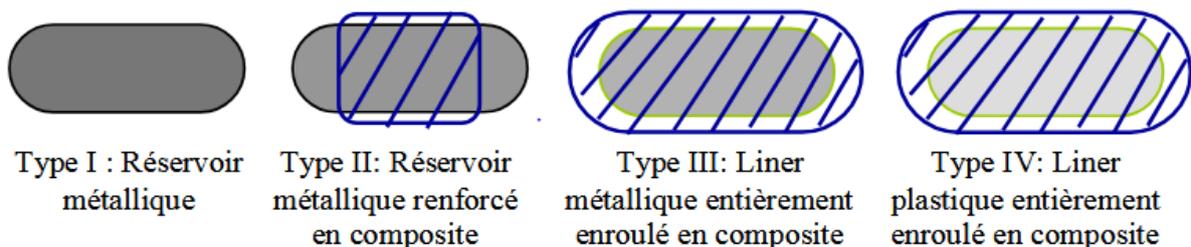


Figure (2.9) : Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé

Nous créons des réservoirs sous pression légers et hautement résistants en utilisant la technique du bobinage filamentaire humide, associée à des procédés de tressage et moulage par transfert de résine pour les géométries plus complexes. Nos réservoirs sous pression en plastique renforcé de fibres de carbone de type 4 peuvent être utilisés jusqu'à 30 ans sans avoir besoin d'être remplacés, soit deux fois l'espérance de vie des réservoirs de type 1 et de type 2 [15].

- Nos réservoirs sous pression de type 4 présentent une pression de travail nominale de 350 bar, 500 bar et 700 bar
- Les réservoirs sous pression de 500 bar offrent une capacité utile de H₂ de 6,2 kg
- Les réservoirs de 350 bar et 700 bar peuvent être livrés dans différentes dimensions.

Chapitre 3

Réservoirs de type IV

3.1 Introduction

Le stockage de l'hydrogène est un verrou technologique et scientifique majeur à son utilisation comme vecteur énergétique, en remplacement des sources d'énergie traditionnelles. 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 [16].

Historiquement, plusieurs technologies de réservoirs pour le stockage de gaz sous pression ont été développées. Les réservoirs de stockage gazeux hyperbare peuvent être classés en quatre catégories selon leurs matériaux constitutifs. « type I, type II, type III, type IV » comme nous avons mentionné dans le chapitre précédent [1].

Parmi tous ces réservoirs, les réservoirs de type IV sont ceux présentant le meilleur ratio performance-masse et la meilleure durée de vie car moins sujet à la fatigue du fait de l'absence d'une contribution métallique dans la partie structurante du réservoir. Seuls les réservoirs de type IV seront étudiés dans ce mémoire du fait qu'il s'agit des réservoirs les plus performants et donc capables de répondre aux besoins en termes de stockage aux très hautes pressions nécessaires pour conserver les autonomies actuelles dans les domaines de l'automobile. Toutefois, le coût élevé de ces réservoirs constitue un frein à leur

développement. Ce coût est dû à la fois au coût de la matière première du matériau composite (fibre de carbone notamment) et aux temps de fabrication relativement lents donc coûteux. On s'aperçoit donc qu'une meilleure compréhension de ces réservoirs serait bénéfique puisqu'elle permettrait d'augmenter notre certitude dans leur conception et dimensionnement. Cela permettrait de réduire les quantités de matière utilisées réduisant à la fois les coûts de matière première et les coûts dus aux temps de fabrication. Une optimisation de ces réservoirs est donc pleinement souhaitée [3].

3.2. L'hydrogène

Aujourd'hui la majeure partie des constructeurs automobiles a retenu la solution de stockage sous forme gazeuse à haute pression, cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein [17].

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). ce pendant, 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 stocker dans des réservoirs ou bouteilles en matériaux [1].

3.3. Réservoirs de type IV

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 [3].

3.3.1. Conception des réservoirs en composites

L'avantage des réservoirs composites est leur légèreté. Une comparaison des masses par unité de volume montre qu'un réservoir en composite présente une masse inférieure de 25 à 75% à celle d'un réservoir en acier du même volume. De même, un réservoir en fibres de carbone à liner polymère permet de gagner 4% de masse par rapport à son homologue à liner aluminium.

Les réservoirs composites de type IV à liner polymère sont de plus en plus légers, moins chers et ont des durées de vie supérieures (absence de fatigue et de fluage du liner) que les réservoirs à liner aluminium. Des progrès sont surtout recherchés dans le composite (tenue à la pression) et le liner polymère (barrière d'hydrogène). Ces deux éléments sont essentiels dans les réservoirs de type IV, le troisième étant constitué par les embases permettant la connexion de remplissage.

L'assemblage du liner polymère avec les embases métalliques est réalisé en premier lieu par rotomoulage réactif. La coque composite externe est ensuite déposée sur l'intégralité de la surface du liner par enroulement filamentaire. La couche imprégnée de résine est appliquée sur le liner par un mouvement d'aller-retour qui permet d'obtenir suivant les différents types d'enroulements nécessaires, le bobinage complet du réservoir. La séquence d'empilement retenue pour le composite. Dans le cadre d'une optimisation du réservoir, la séquence d'empilement joue un rôle important au niveau de la coque composite. Cet élément est majeur en termes de masse et de coût [1].

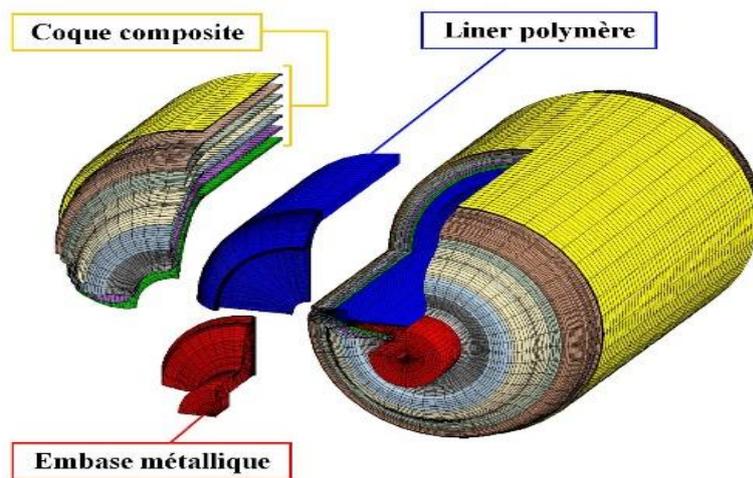


Figure (3.1) : Schéma des composants d'un réservoir de type IV

3.3.2. Architecture d'un réservoir type IV

Un réservoir type IV comporte successivement, de l'intérieur vers l'extérieur [18].

A. L'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.

B. La structure résistante

Les torons de fibres sont déposés par enroulement filamenteux : 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.

C. La 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.

3.3.3. Réservoir type IV en composites

3.3.3.1. Les matériaux composites utilisés

Dans le cadre de cette étude nous utilisons des fibres haute résistance de type T700SC Cette fibre est reconnue comme celle ayant le meilleur rapport « performance mécanique/prix » pour les réservoirs de stockage embarqué de l'hydrogène gazeux haute pression (700 bar). Les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques moyennes (données fabricant) sont présentées dans le Tableau (3.1) [1].

Propriétés physiques	
Masse volumique (g/cm ³)	1,80
Diamètre des filaments (µm)	7
Propriétés mécaniques	
Module d'Young (GPa)	230
Contrainte à rupture (MPa)	4961
Allongement à rupture (%)	1,80

Tableau (3.1) : Propriétés de la fibre de carbone T700SC

Nous utilisons dans notre étude un composite à matrice époxyde. Cette matrice appartient à la classe des polymères thermodurcissables, elle présente un bon accrochage sur les fibres, un faible retrait lors du moulage (de l'ordre de 0.5%) et de bonnes propriétés mécaniques.

Les caractéristiques générales de cette résine époxy sont présentées dans le tableau (3.2).

Propriétés physiques	
Masse volumique (g/cm ³)	1,18
Propriétés thermiques	
Température de transition vitreuse (°C)	117
Température de transition vitreuse (°C) après 24-Hr faire bouillir dans l'eau	67
Propriétés mécaniques	
Module d'élasticité en traction (GPa)	2,83
Contrainte à rupture en traction (MPa)	68,90
Allongement à rupture (%)	5,30

Tableau (3.2) : Propriétés de la résine époxy UF3369

3.3.3.2. 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 3.2). 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 [3].



Figure (3.2) : Procédé de fabrication des réservoirs composites par enroulement filamentaire

On distingue trois types d'enroulement pour les réservoirs de stockage Figure (3.3) l'enroulement « circonférentiel », pour lequel le renfort fait un angle d'environ 90° 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.

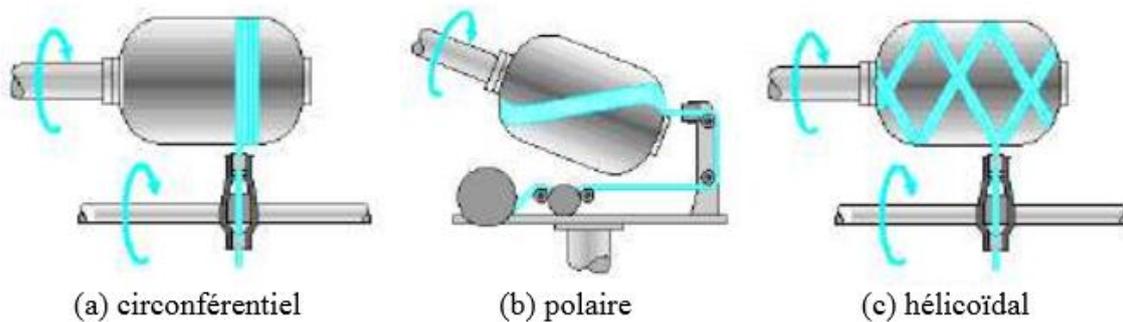


Figure (3.3): Différents types de dépose de la nappe par enroulement filamentaire

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° 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.

3.3.4. Fabrication du Réservoir type IV en composites

Le réservoir de l'étude dans le cadre du projet ENDEMAT reste limité à une bouteille 2L fabriquée par le CEA. Le liner du réservoir est en thermoplastique (PA6, polyamide 6 modifié ou polyuréthane). L'embase métallique est en inox 316L. Les matériaux de ces deux éléments sont compatibles avec l'environnement hydrogène car ils sont directement exposés à ce gaz

pour les parties internes. Enfin, le matériau utilisé pour la fabrication de la coque composite est un pré-imprégné fibres de carbone/matrice époxy (TCR T700SC/UF3369) [1].

3.3.4.1. Description du procédé de fabrication

La fabrication du réservoir commence par celle du liner qui assumera la fonction de mandrin pour l'enroulement filamentaire. Le liner du réservoir est fabriqué par rotomoulage réactif (Figure 3.4), technique traditionnelle de mise en forme des polymères avec les deux fonds munis chacun d'une embase. Les plans du liner et de l'embase sont présentés sur les Figures (3.5) et (3.6).

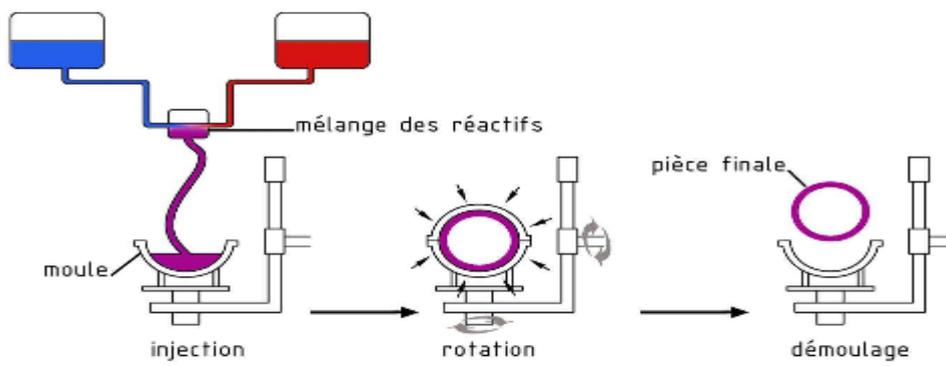


Figure (3.4) : Schéma décrivant le procédé de rotomoulage réactif

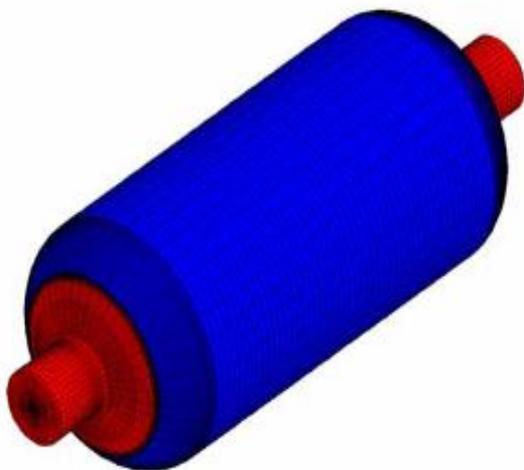


Figure (3.5) : plan du liner

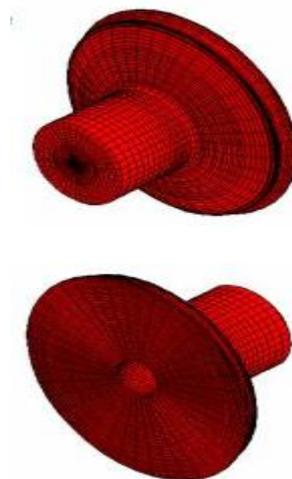


Figure (3.6) : plan d'une embase

La coque composite est réalisée par enroulement filamentaire directement sur le liner en suivant une trajectoire géodésique au niveau du dôme.

L'architecture composite se compose des couches circonférentielles et des couches hélicoïdales. Les couches hélicoïdales sont déposées de l'angle le plus faible à l'angle le plus élevé. Les couches circonférentielles sont intercalées afin de compacter les couches hélicoïdes sur le cylindre.

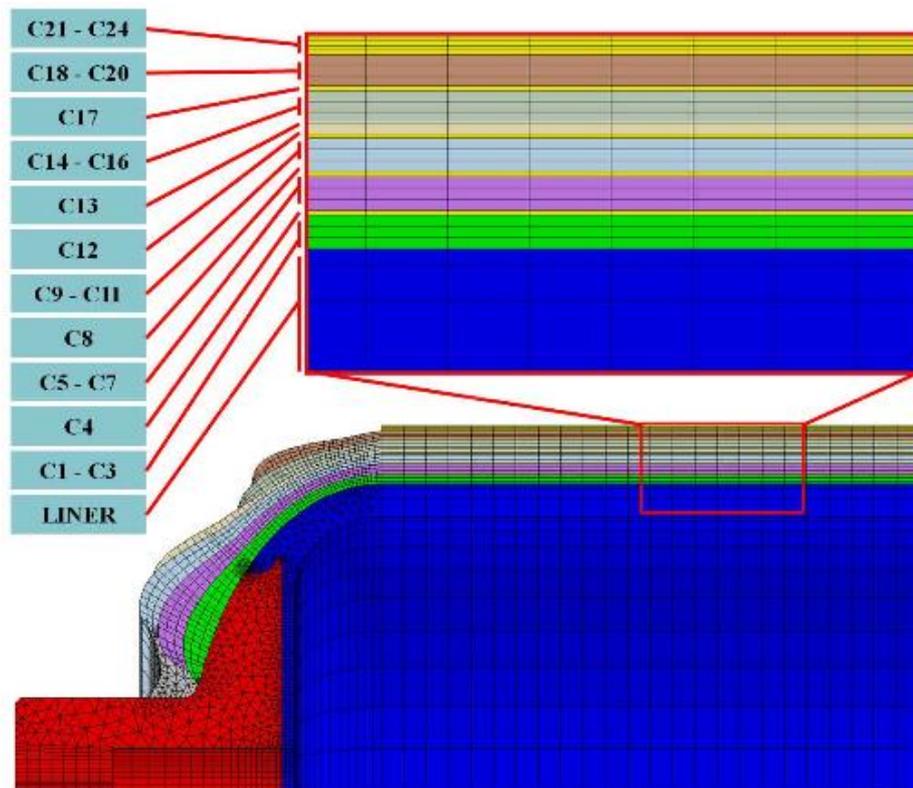


Figure 3.7 : Cycle de polymérisation du réservoir

Le réservoir est ensuite polymérisé dans une étuve. Il est également mis en rotation au cours du cycle de température. Le cycle de cuisson utilisé pour ce réservoir est un maintien en palier de 6h à 110°C [1].

3.3.4.2. 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.

Chapitre4

Calculs et vérifications

4.1. Introduction

Dans La première partie de ce chapitre, nous détaillerons la modélisation de la structure d'un réservoir type 4 par logiciel SOLIDWORKS.

Dans la deuxième partie, on va présenter des calculs (les contraintes, les déformations et les déplacements) sur le réservoir type 4 en utilisant la fonction « Simulation » du logiciel «Ansys», ce qui permet de construire une maquette virtuelle pour illustrer et vérifier les solutions proposées de la conception préalable de ce réservoir .

Après avoir présenté les résultats, nous pouvons apprendre les facteurs de fabrication d'un réservoir en matériaux composites :

- l'orientation des fibres ;
- le nombre des plis ;
- l'épaisseur totales des plis (l'épaisseur de stratifié) ;
- les matériaux composites utilisés.

4.2. Logiciel utilisé

- **SOLIDWORKS**

Nous utiliserons la version SOLIDWORKS 2016.

SOLIDWORKS est l'un des logiciels les plus pertinents dans les domaines de l'ingénierie, et pas seulement mécanique. Le plus gros inconvénient est son prix mais vous pouvez surmonter celui-ci en prenant la version éducative.

Les conceptions et les modèles seront mis sur le marché plus rapidement lorsque le logiciel SOLIDWORKS est utilisé.

Les concepteurs et les ingénieurs peuvent apporter rapidement des modifications aux conceptions, résoudre des problèmes de conception et créer des produits de manière économique, lorsque des erreurs sont détectées automatiquement au début du programme [19].

- 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 [20].

4.3. Conception du modèle

Le réservoir type 4 est composé de 3 parties comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédant (liner polymère, embase métallique et coque composite).

4.3.1 Liner

Les numéros dans les photos suivants expliquent la méthode utilisée dans la conception du liner.

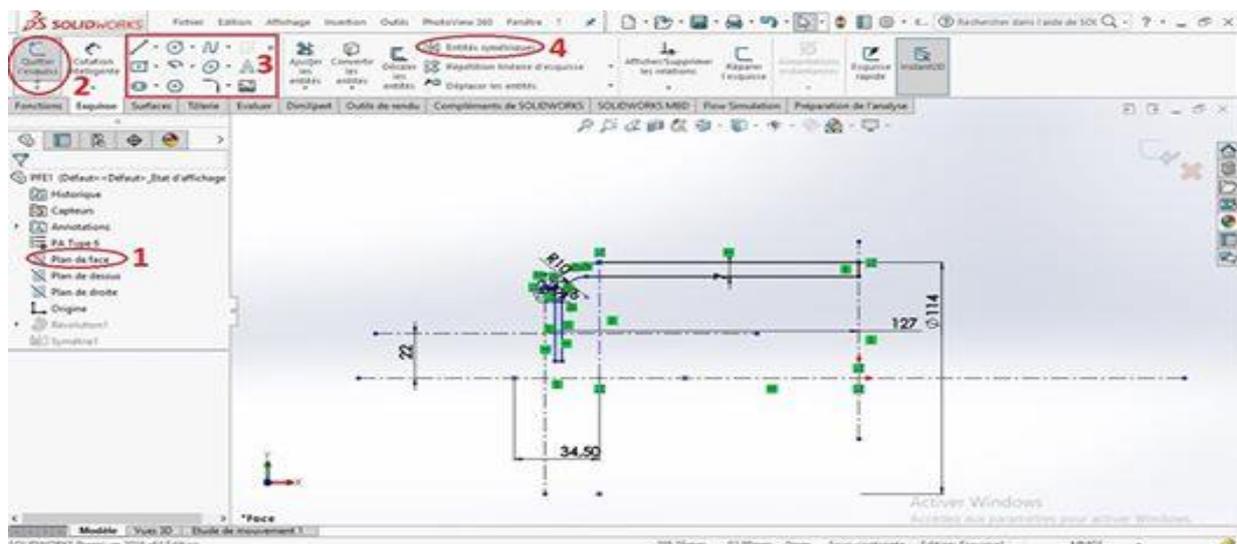


Figure (4.1) : Dessin initial de liner

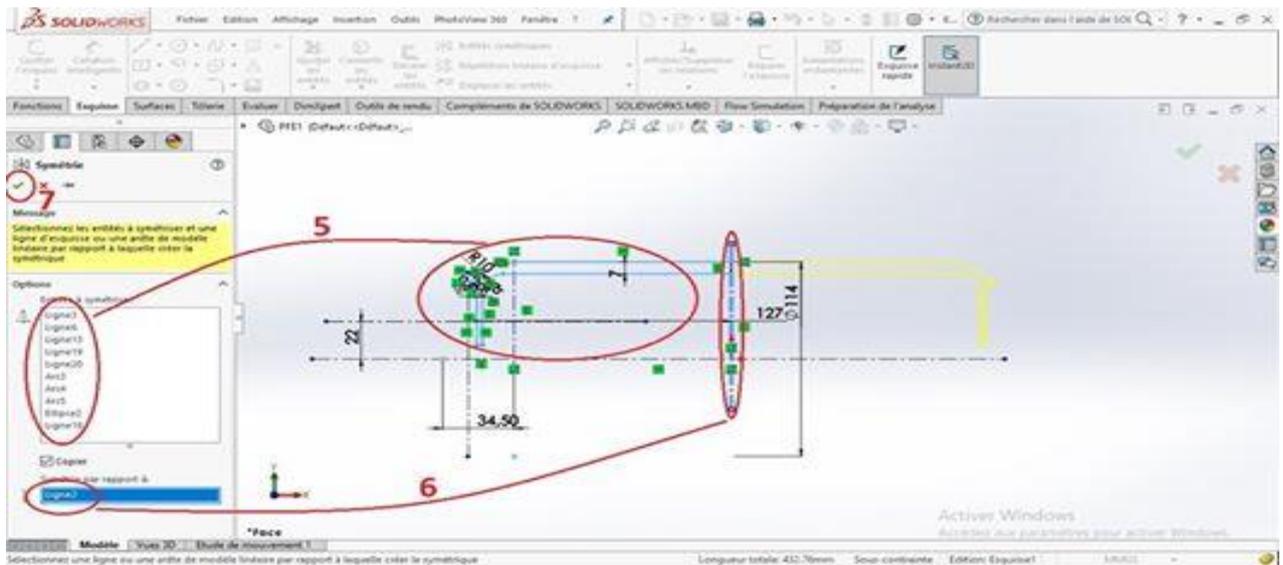


Figure (4.2) : La symétrie

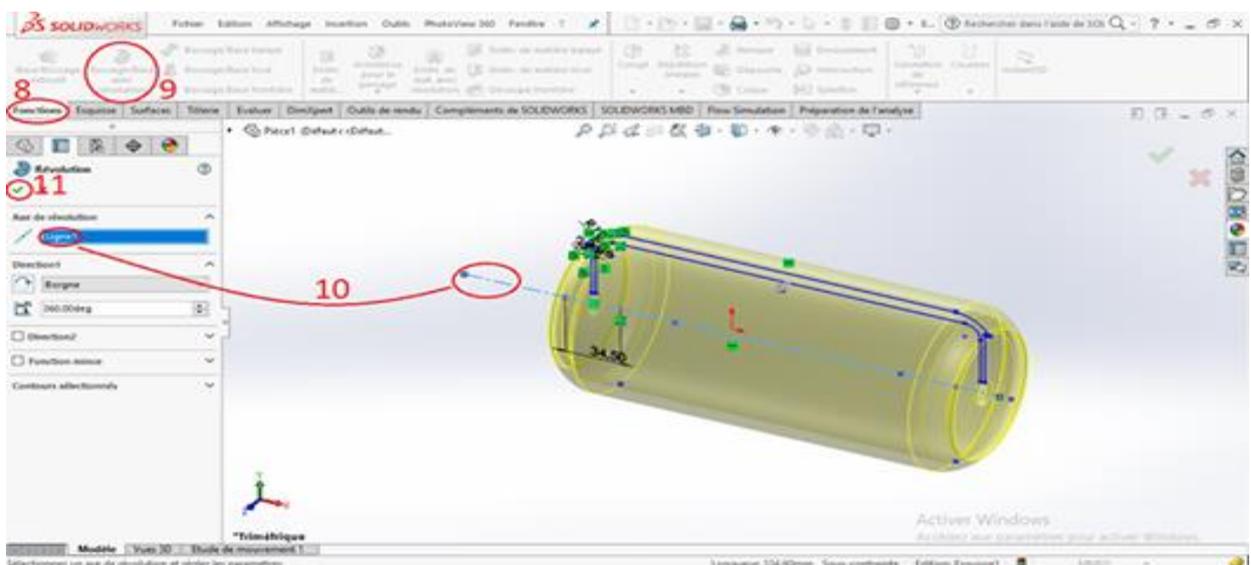


Figure (4.3) : Etapes pour obtenir un volume de liner.

Après la conception, nous choisissons le matériau de liner.

Pour le réservoir de type IV, le liner est en polymère (thermoplastique ou thermodurcissable) qui ne supporte pas la charge mais assure seulement l'étanchéité à l'hydrogène. Parmi les choix de matériaux, le liner en polymère thermoplastique (PA6) a été choisi par le CEA. L'avantage important d'un polymère thermoplastique est son potentiel de recyclage et sa capacité de s'adapter au procédé de rotomoulage réactif. En revanche, son

comportement mécanique est relativement plus faible comparé au polymère thermodurcissable [1].

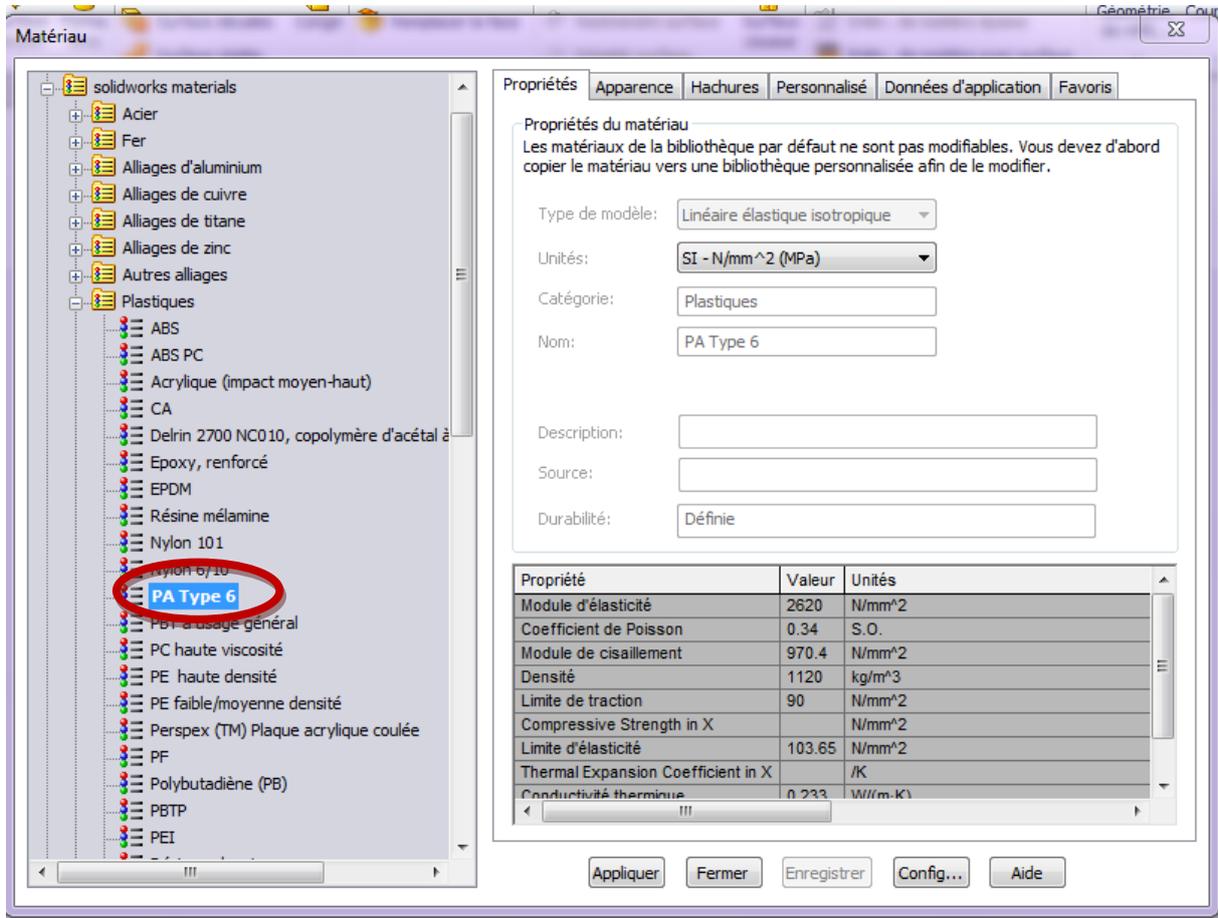


Figure (4.4) : Propriétés mécaniques de liner polymère PA

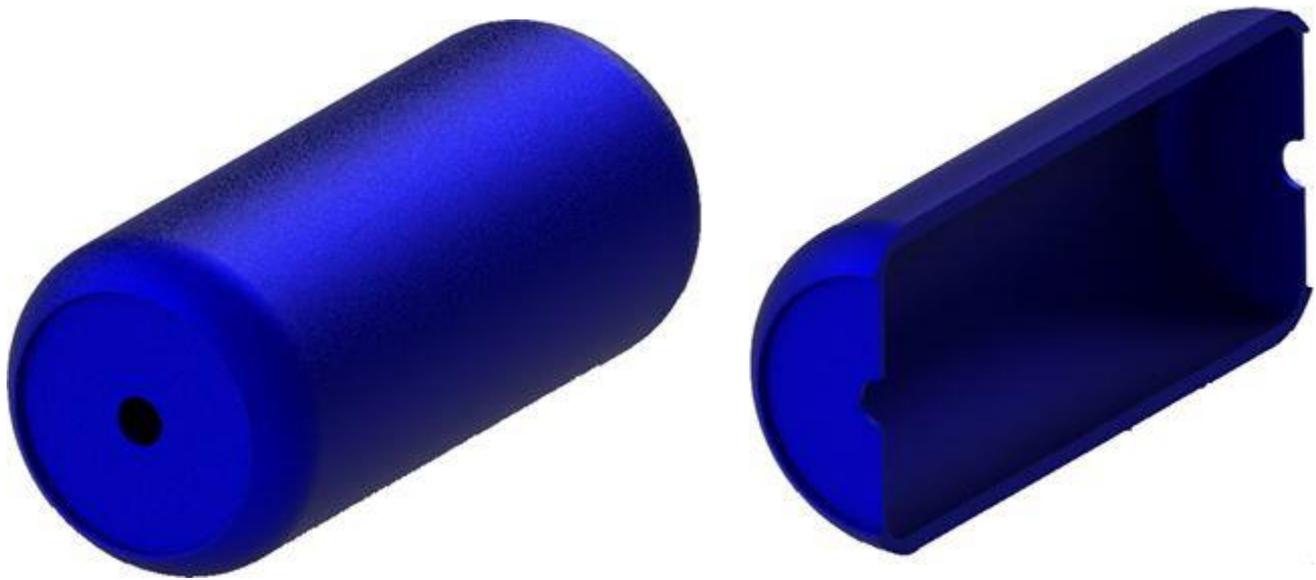


Figure (4.5) : Liner polymère PA6 finale

4.3.2 Embase

Conception de l'embase.

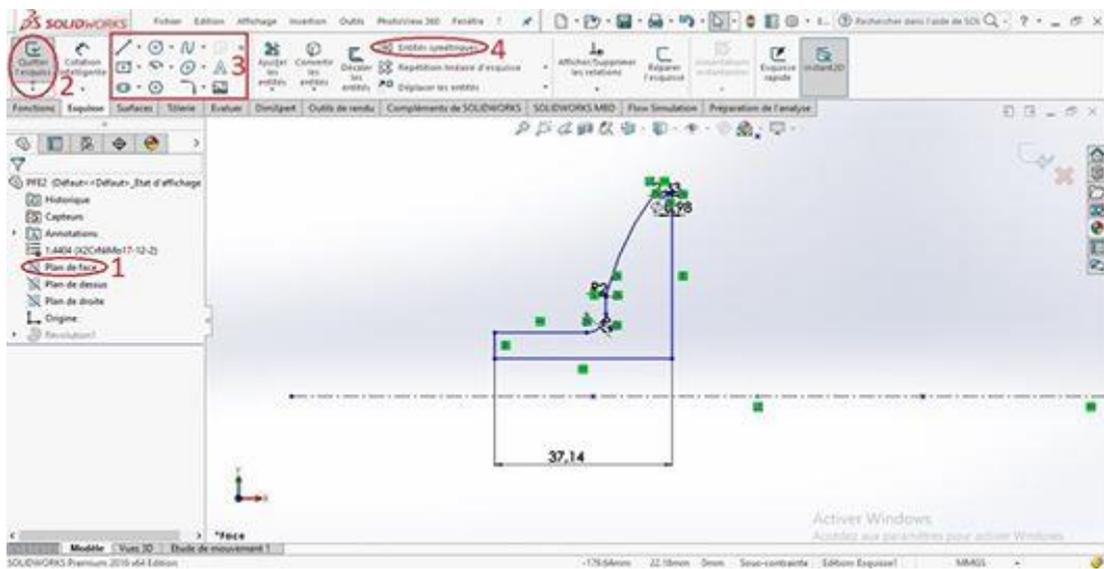


Figure (4.6) : Dessin initial de l'embase

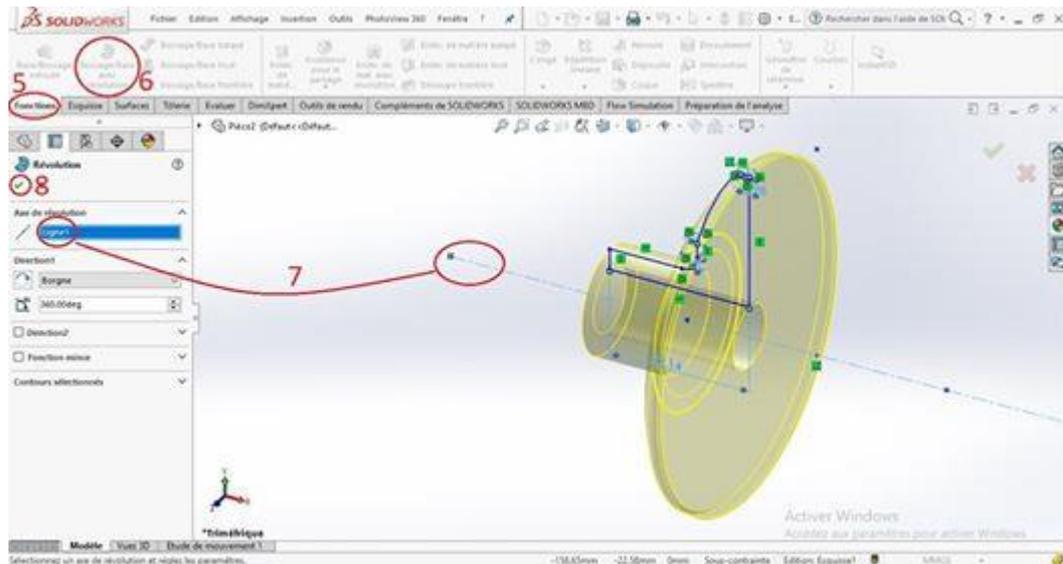


Figure (4.7) : Les étapes pour obtenir un volume de l'embase

Ensuite, nous choisissons le matériau de l'embase.

Selon les conditions d'utilisation du réservoir, le matériau de l'embase doit être capable de tenir à l'hydrogène, de créer une bonne interface avec le polymère pour pallier des besoins d'étanchéité et si possible, se situer dans une gamme de prix économiquement raisonnable. L'inox 316L, acier inoxydable AISI 316 L (en désignation européenne X2CrNiMo 17-12-2) semble être ce bon candidat. Cette famille d'aciers inoxydables trouve depuis longtemps, pour ses propriétés mécaniques et sa tenue à l'hydrogène, de nombreuses applications auprès du CEA [1].

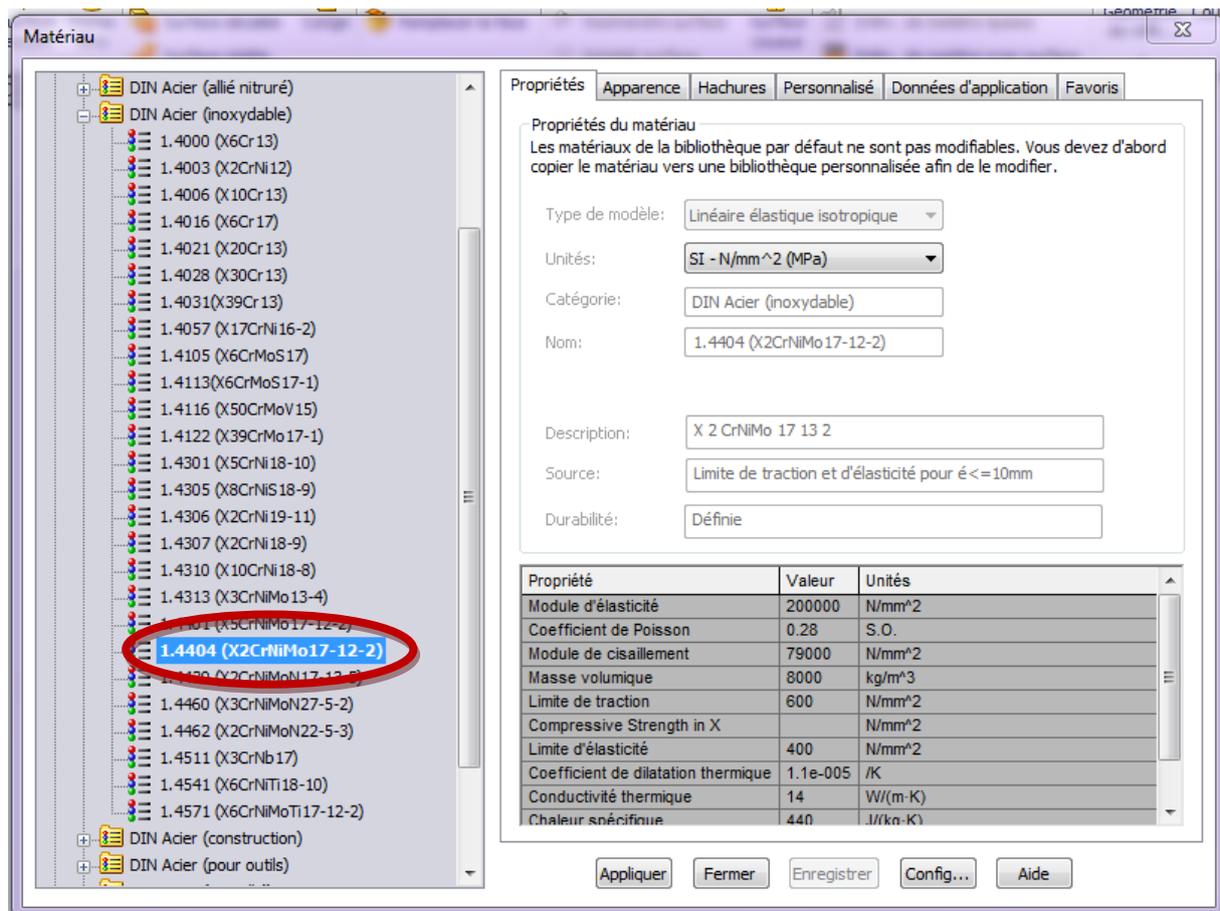


Figure (4.8): Propriétés mécaniques des aciers inoxydables AISI 316 (X2CrNiMo 17-12-2)



Figure (4.9) : l'embase (X2CrNiMo 17-12-2) finale

4.3.3 Coque composite

La Conception de la coque composite se fait suivant les étapes suivantes :

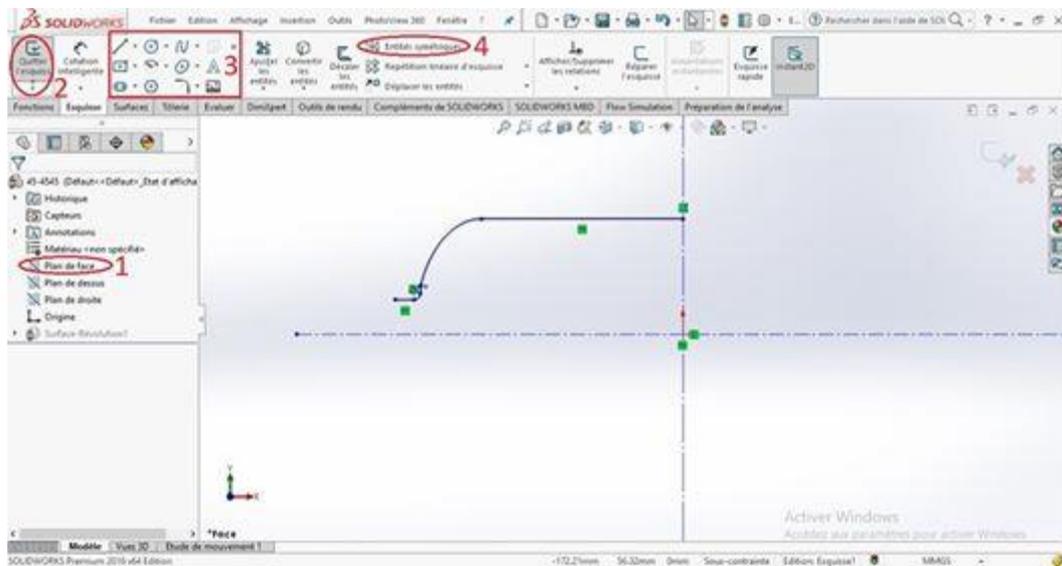


Figure (4.10) : Dessin initiale de coque composite.

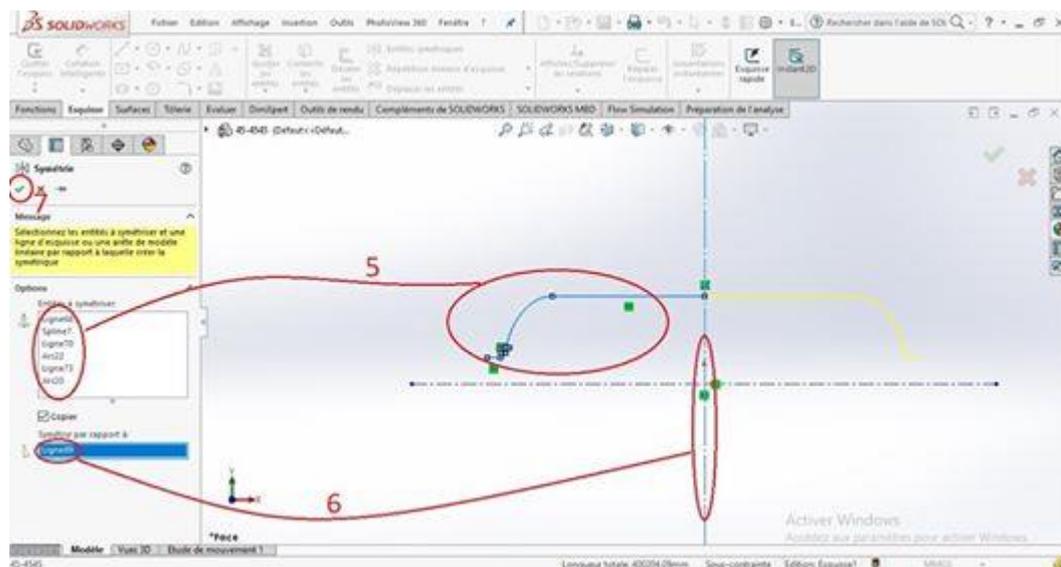


Figure (4.11) : Etapes pour la symétrie de dessin

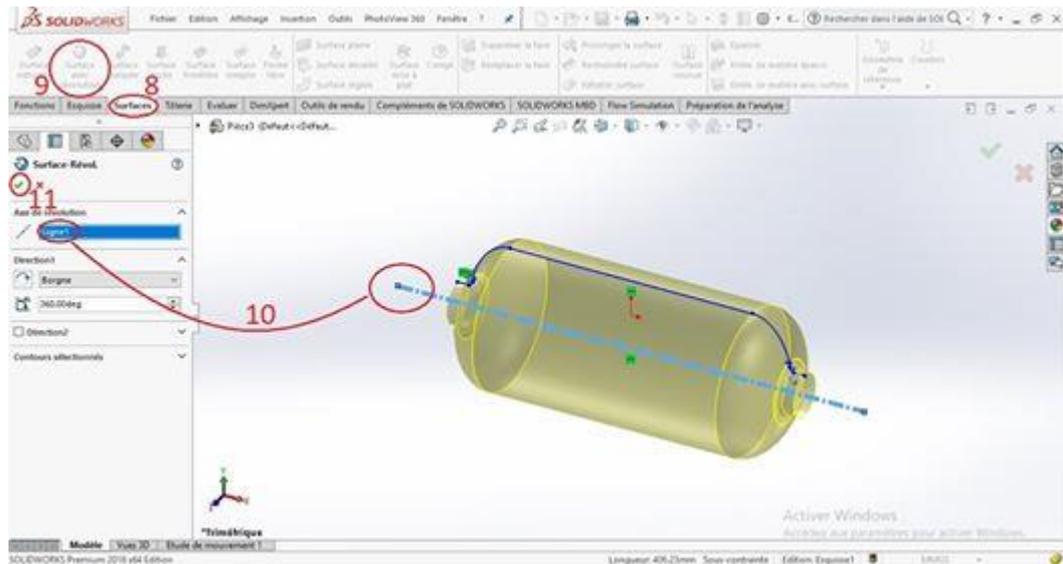


Figure (4.12) : Etapes pour obtenir un volume.

Le matériau utilisé pour la fabrication de la coque composite dans le réservoir type 4 est le carbone époxy (TCR T700SC/UF3369) [1].

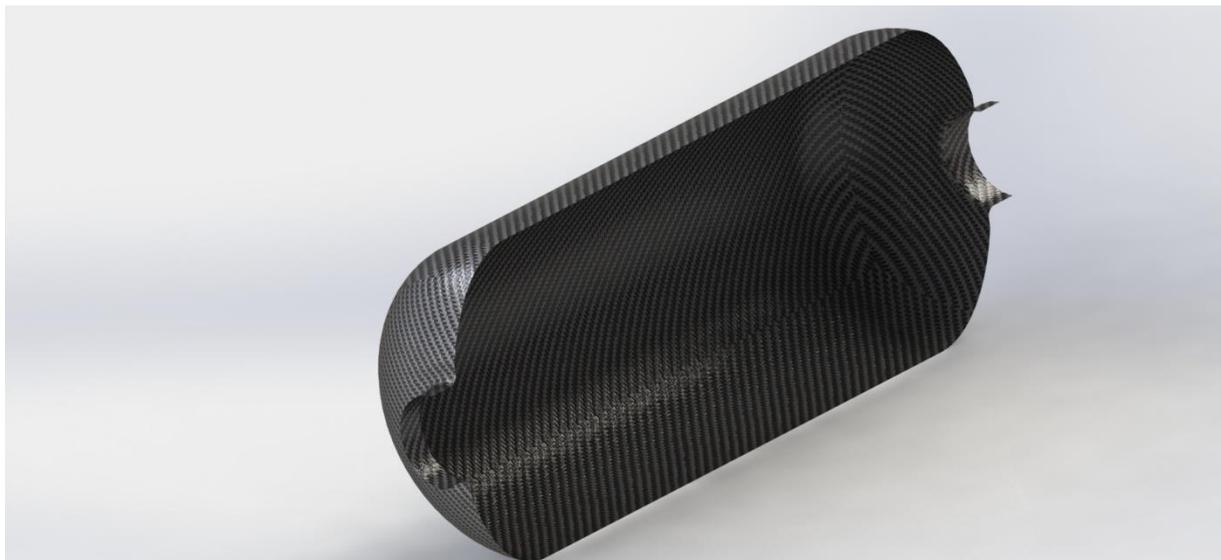


Figure (4.13) : Coque en composite (Carbone /Epoxy)

4.3.4 L'assemblage

La dernière étape dans la conception du réservoir de type 4 est l'assemblage des 3 pièces.

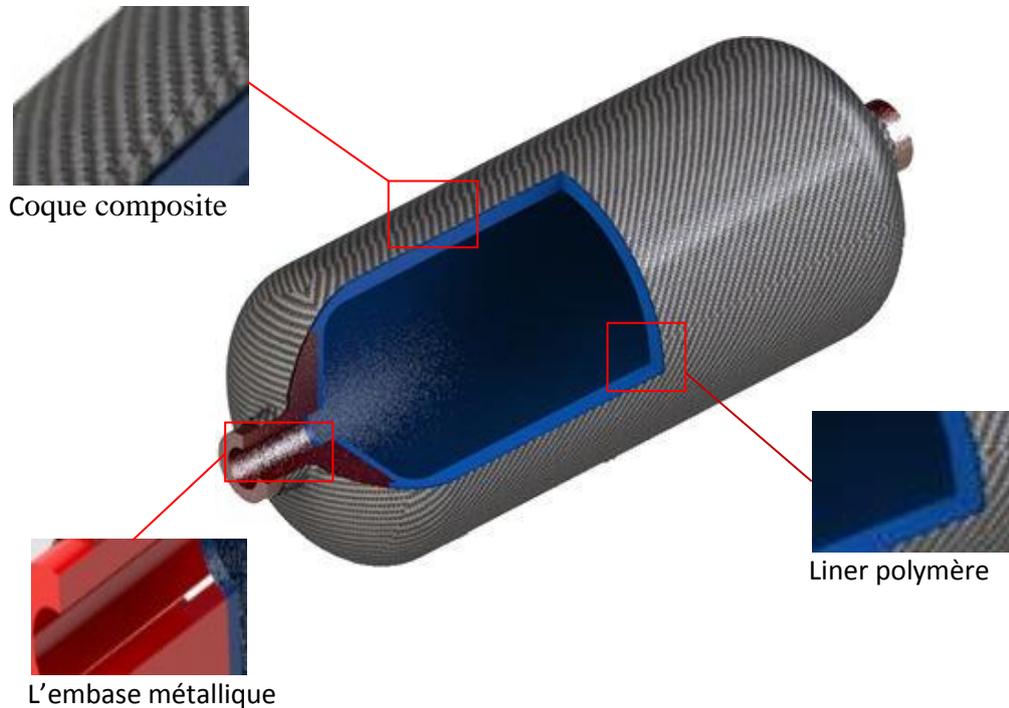


Figure (4.14) : Schéma de présentation de l'étude

4.4 Simulation

La séquence d'empilement joue un rôle important au niveau de la coque composite. Donc, nous avons changé le nombre de plis, l'orientation des fibres, l'épaisseur du stratifié et les matériaux pour déterminer les meilleures caractéristiques de la coque composite.

4.4.1 L'influence de nombre de plis

L'architecture composite se compose en 24 couches dont 8 circonférentielles et 16 hélicoïdales. Les couches hélicoïdales sont déposées de l'angle le plus faible à l'angle le plus élevé. Les couches circonférentielles sont intercalées afin de compacter les couches hélicoïdes sur le cylindre. La séquence d'empilement sur le cylindre est présentée sur le Tableau (4.1).

Partie 1	Numéro des plis	Orientation	Epaisseur totale	Matériaux utilisés
1 ^{er} simulation	24	[20 ₃ /90/22 ₃ /90/28 ₃ /90/40/56 ₃ /90/62 ₃ /90 ₄]	10.54mm	Carbone /Epoxy
2 ^{ème} simulation	18	[20 ₃ /90/22 ₃ /90/28 ₃ /90/40/56 ₃ /90/63]		
3 ^{ème} simulation	16	[20 ₃ /90/22 ₃ /90/28 ₃ /90/40/56 ₃]		
4 ^{ème} simulation	10	[20 ₃ /90/22 ₃ /90/28 ₂]		
5 ^{ème} simulation	8	[20 ₃ /90/22 ₃ /90]		

Tableau (4.1) : stratifiées étudiées

1^{er} simulation : nombre de plis 24

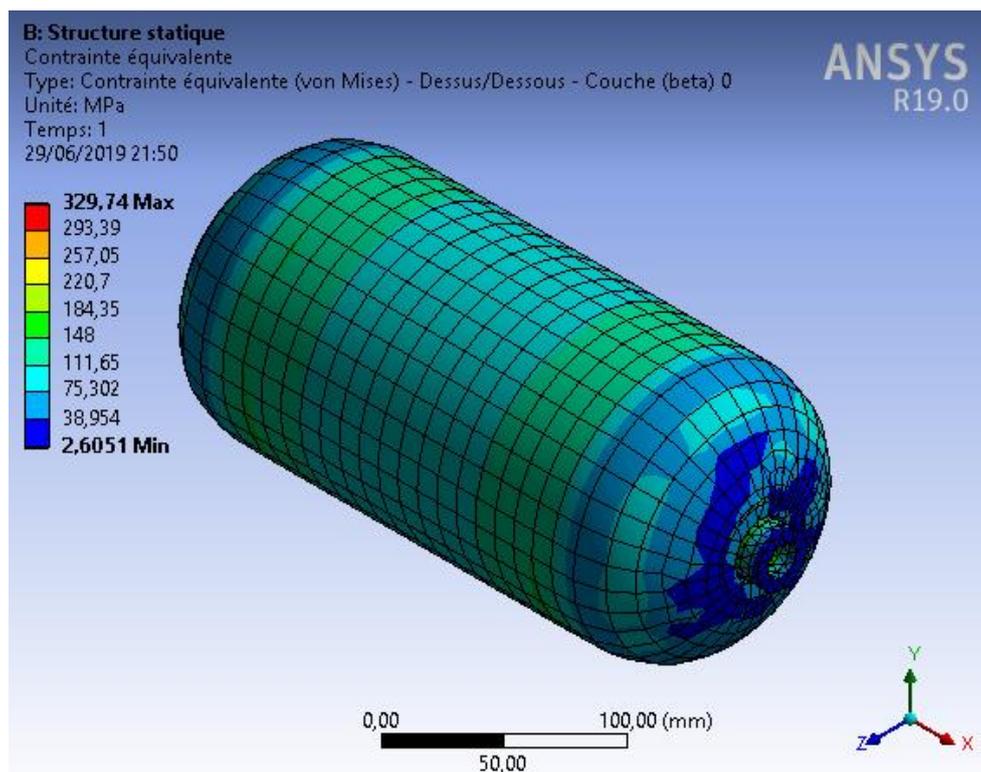


Figure (4.15) : Résultat de contraintes de Von Mises

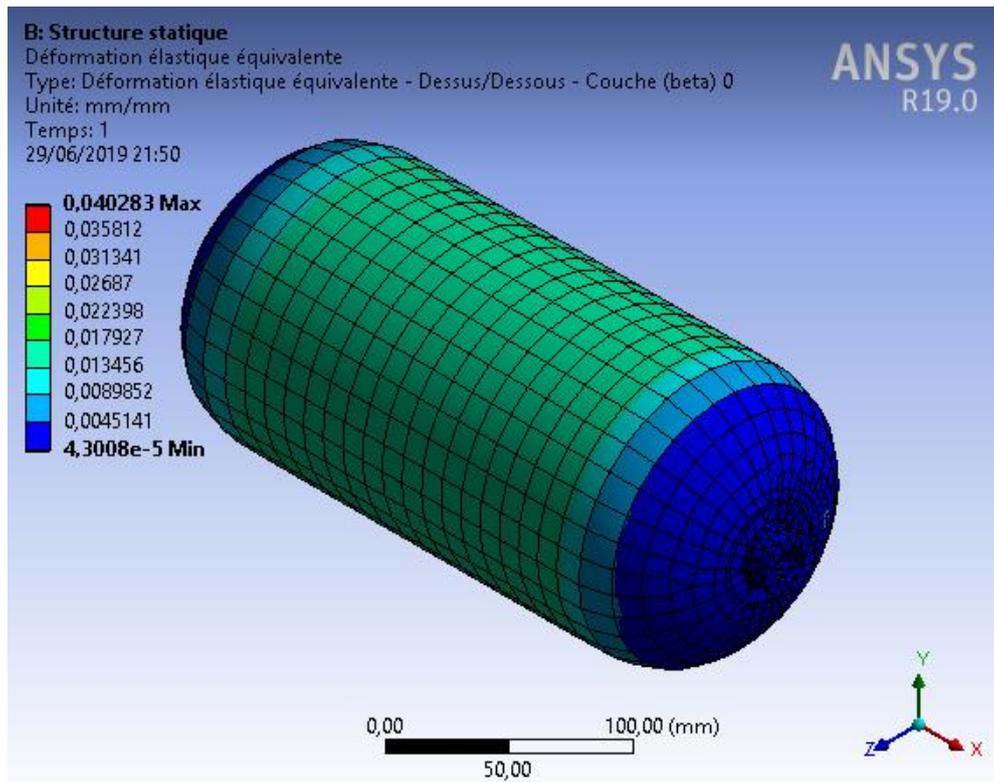


Figure (4.16) : Résultat de déformations

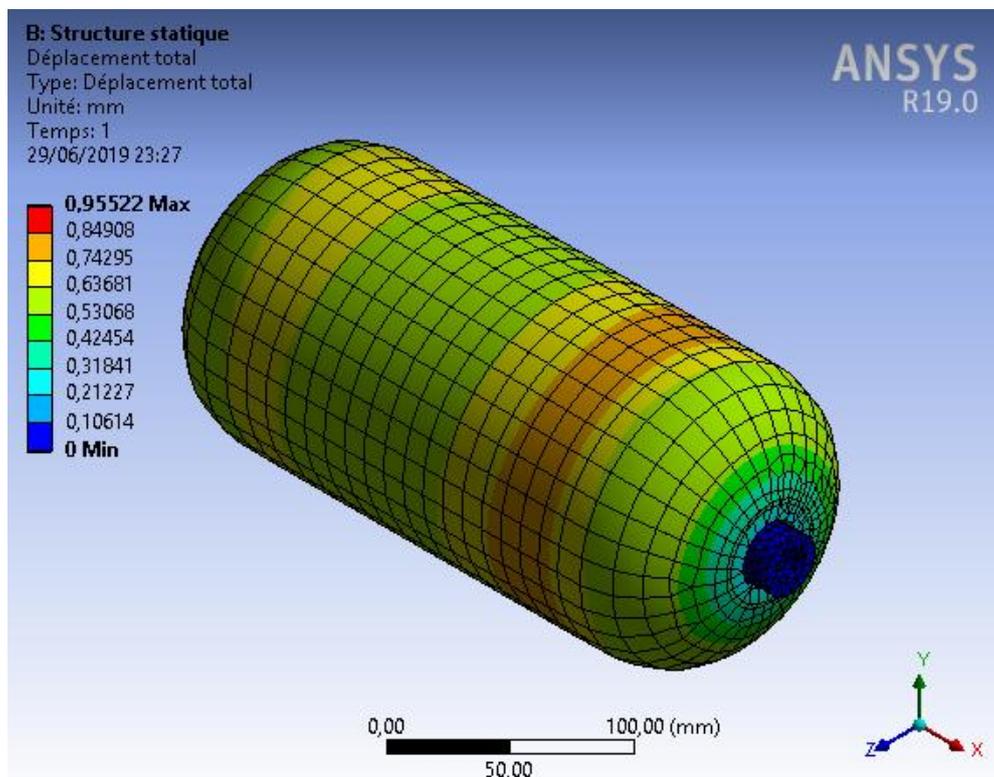


Figure (4.17) : Résultat de déplacements

2^{ème} simulation Nombre de plis 18

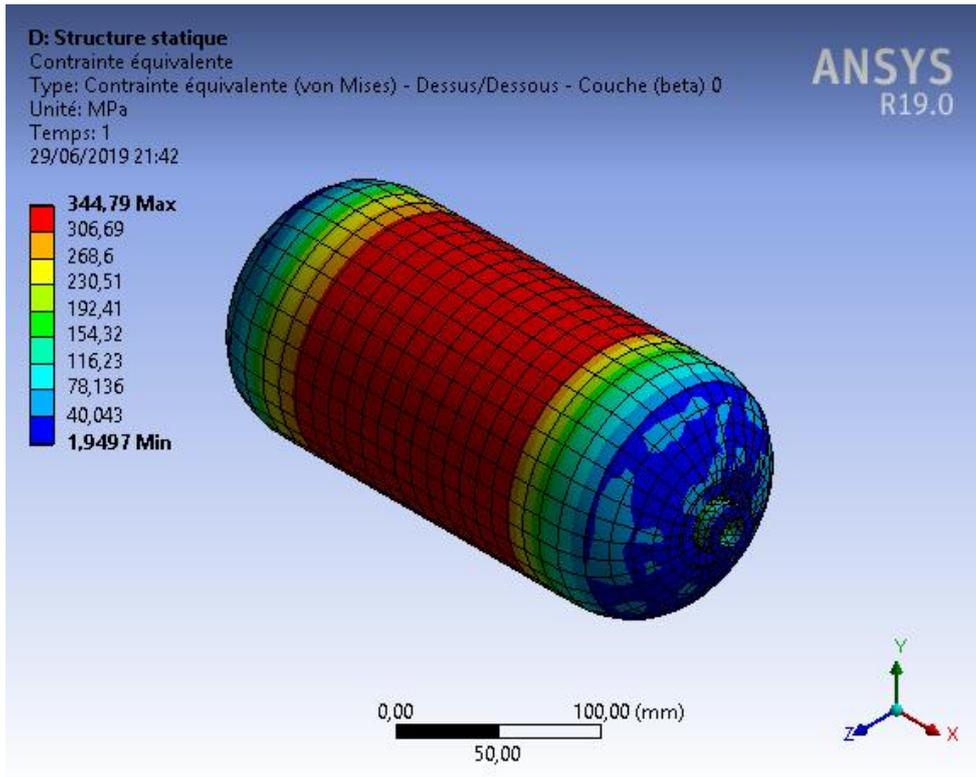


Figure (4.18) : Résultat de contraintes de Von Mises

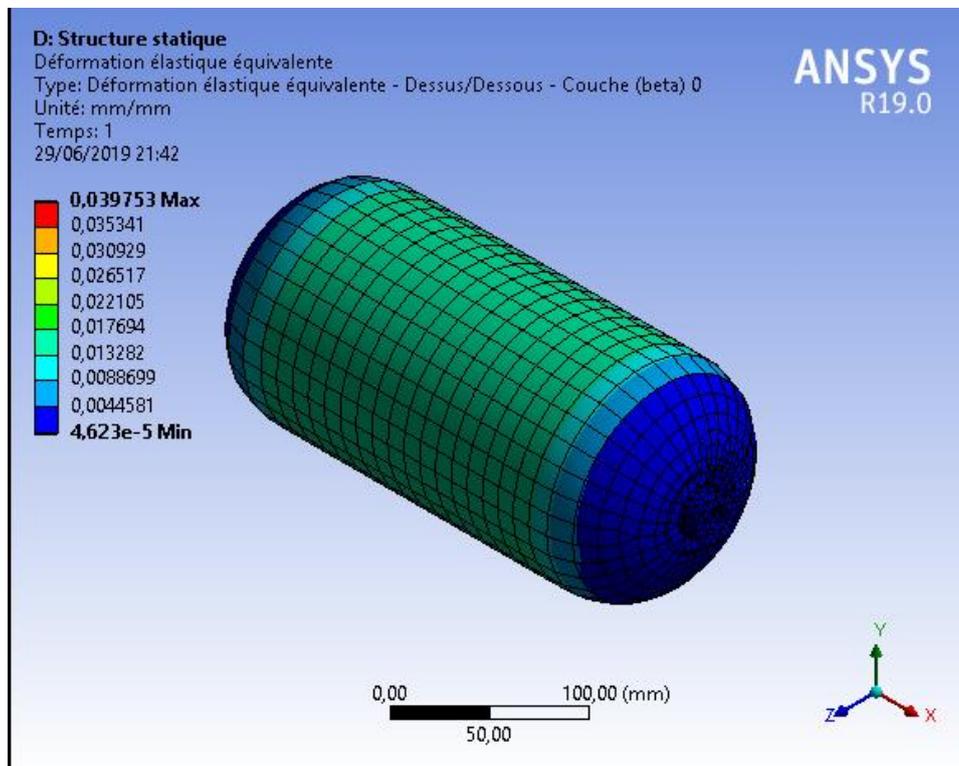


Figure (4.19) : Résultat de déformations

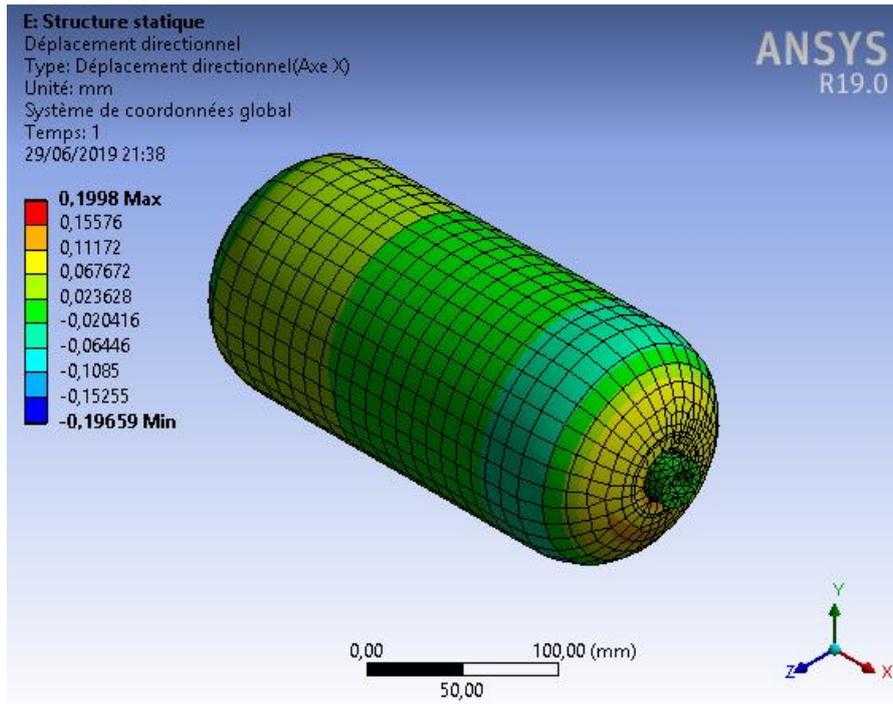


Figure (4.20) : Résultat de déplacements

3^{ème} simulation : nombre de plis 16

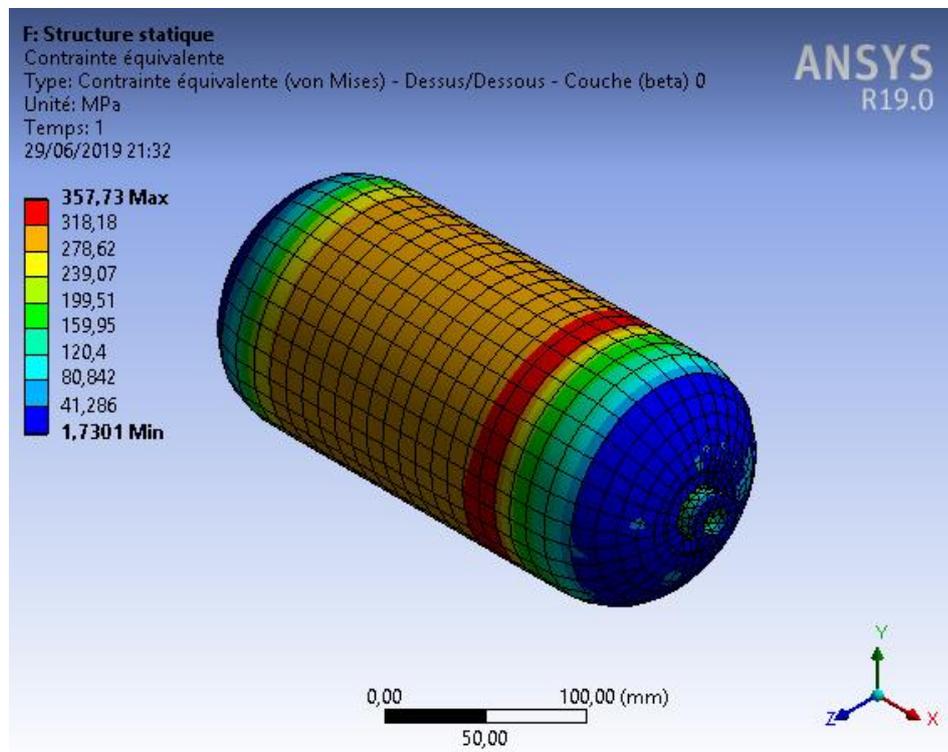


Figure (4.21) : Résultat contraintes de Von Mises

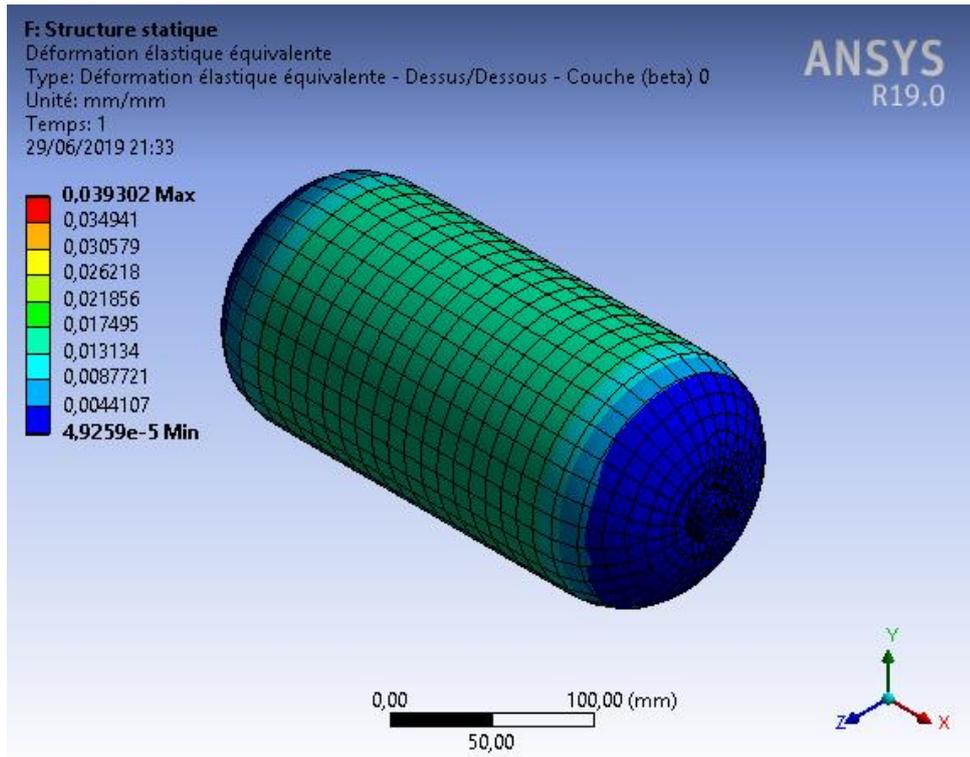


Figure (2.22) : Résultat de déformations

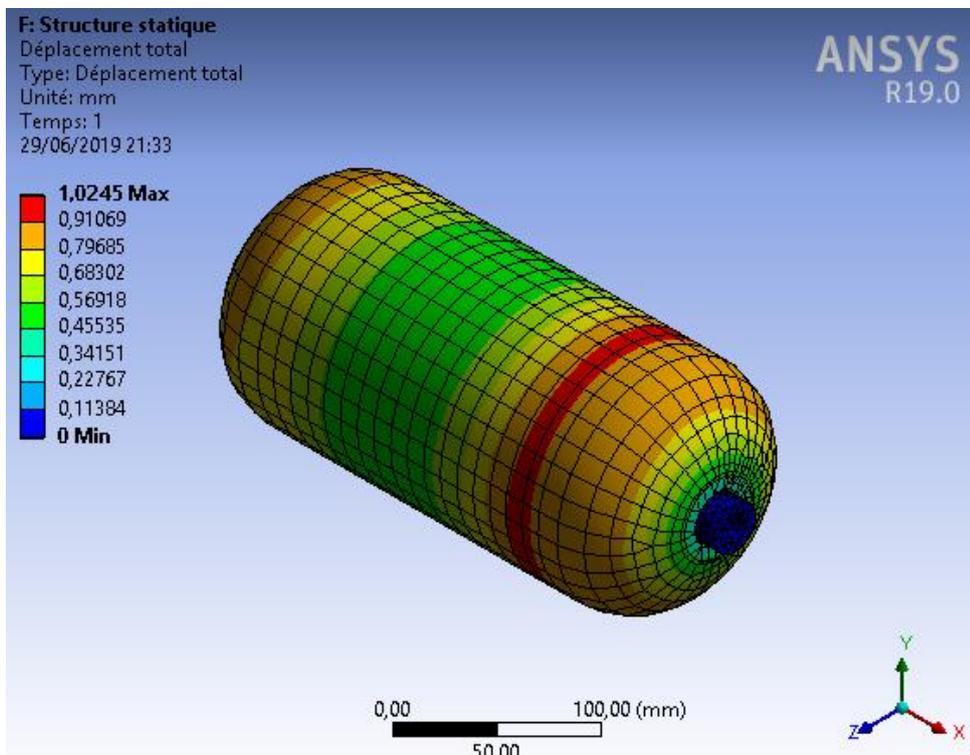


Figure (2.23) : Résultat de déplacements

4^{ème} simulation : nombre de plis 10

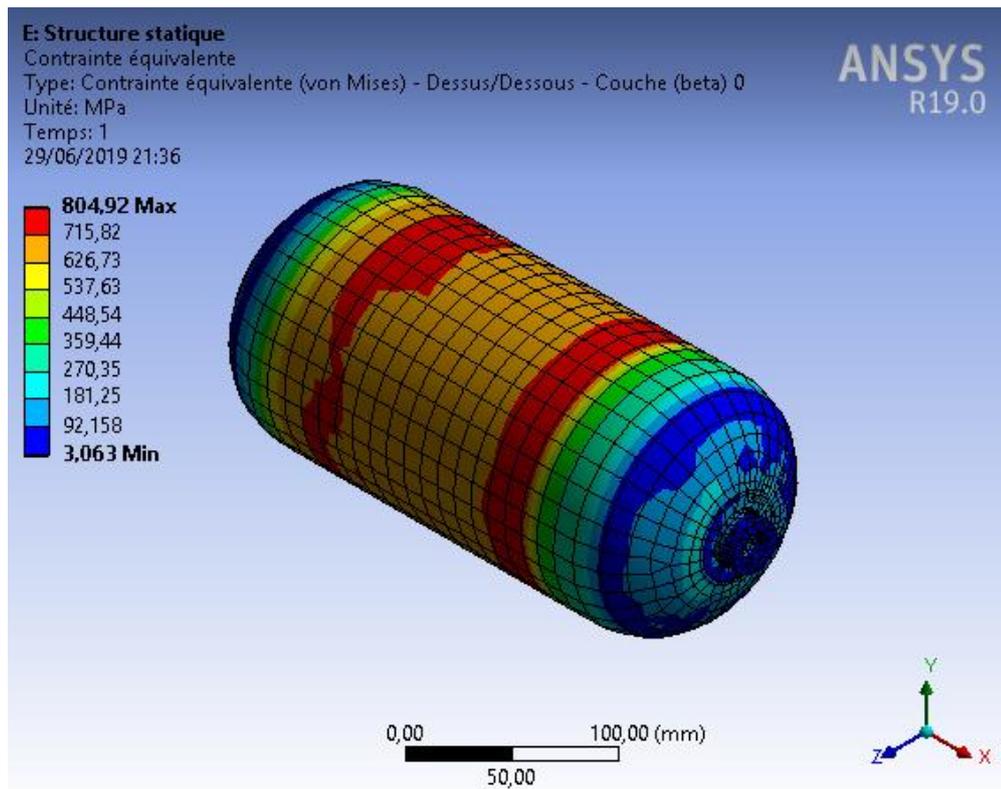


Figure (4.24) : Résultat de contraintes de Von Mises

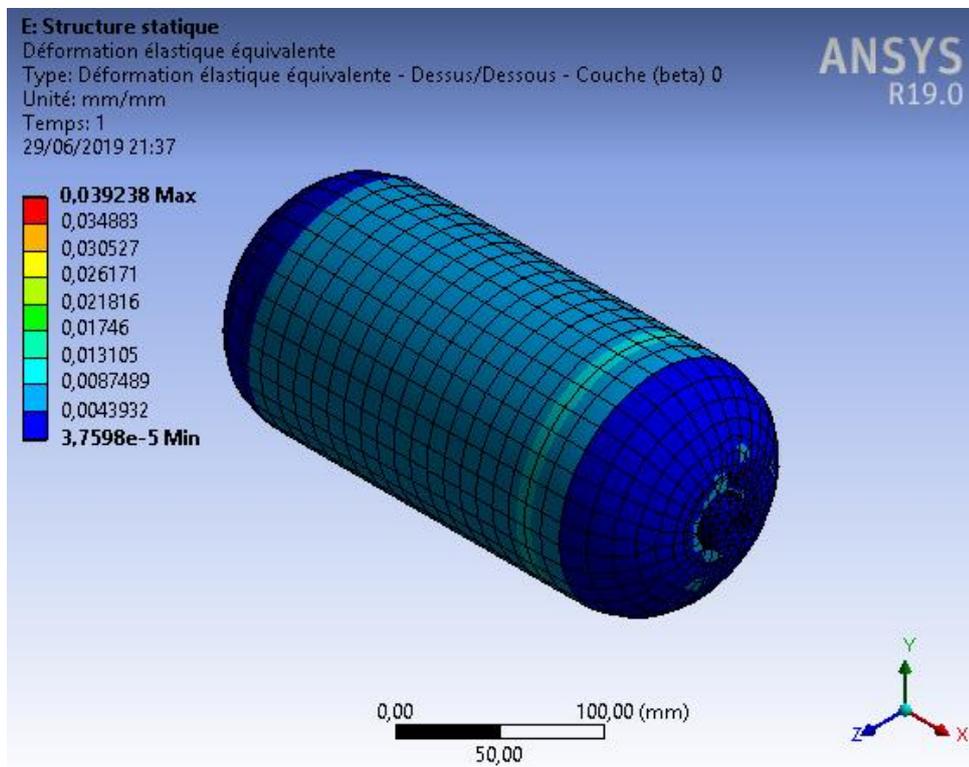


Figure (4.25) : Résultat de déformations

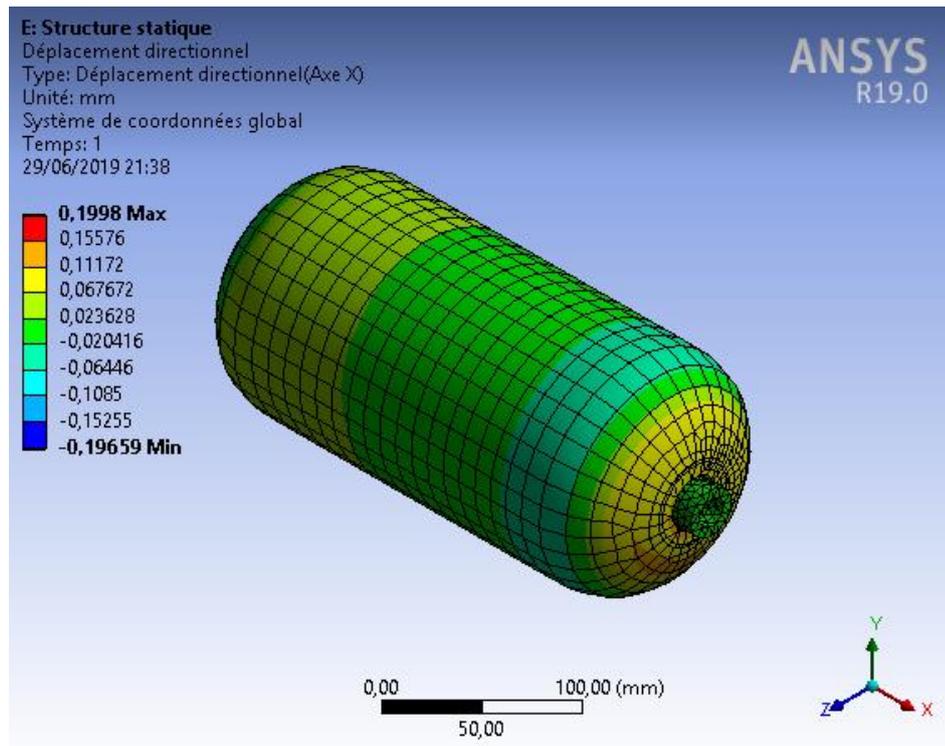


Figure (4.26) : Résultat de déplacements

5^{eme}simulation

- Nombre des plis 8

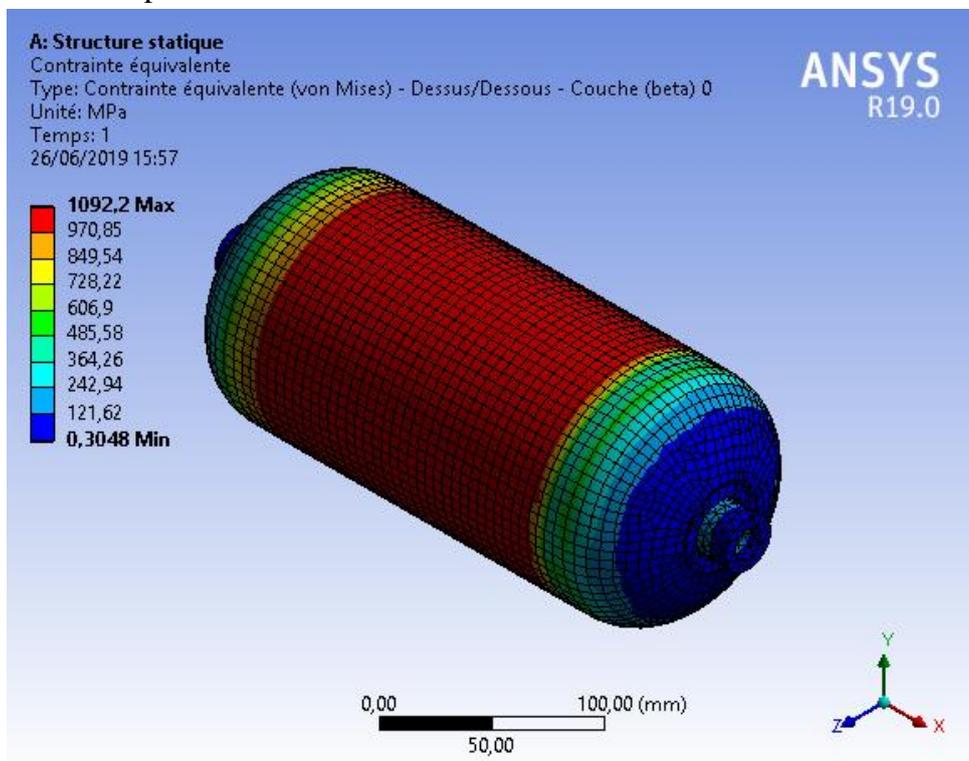


Figure (4.27) : Résultat de contraintes Von Mises

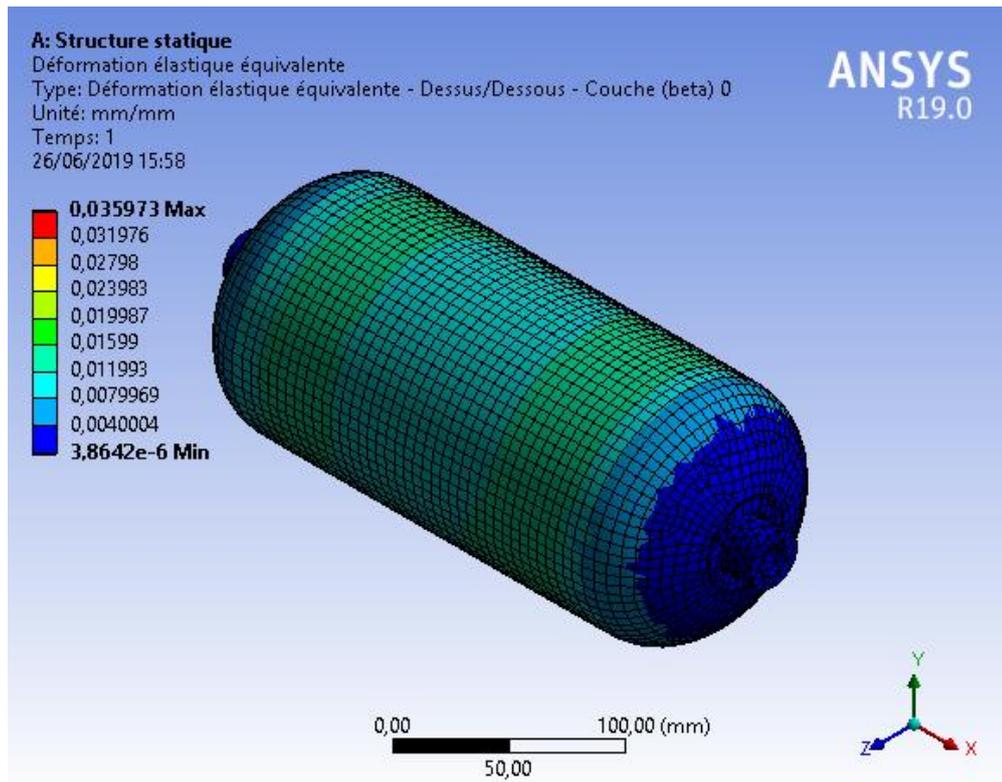


Figure (4.28) : Résultat de déformations

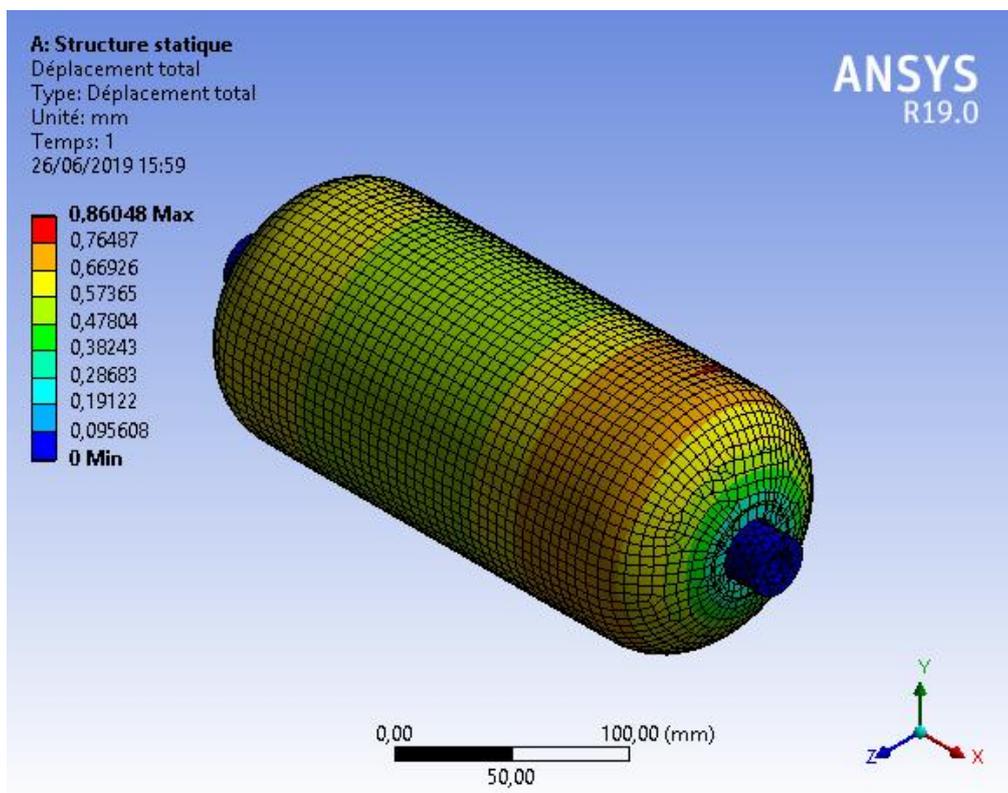


Figure (4.29) : Résultat de déplacements

	contrainte de Von Mises(MPA)	déformation	Déplacement (mm)
1^{er} simulation	329.74	0.04028	0.95522
2^{eme}simulation	344.79	0.039753	0.1998
3^{eme}simulation	357.73	0.039302	1.0245
4^{eme}simulation	804.92	0.039238	0.1998
5^{eme}simulation	1092.2	0.035973	0.86048

Tableau (4.2) : déplacements, déformations et contraintes dans les trois stratifier

D'après les résultats obtenus (tableau (4.2)) :

A. Stratifié à 24 plis

$$\sigma_{Von Mises} = 329.74 < \frac{\sigma_e}{s} = \frac{1266}{3} = 422MPA$$

B. Stratifié à 18 plis

$$\sigma_{Von Mises} = 344.79 < \frac{\sigma_e}{s} = \frac{1266}{3} = 422MPA$$

C. Stratifié à 16 plis

$$\sigma_{Von Mises} = 357.73 < \frac{\sigma_e}{s} = \frac{1266}{3} = 422MPA$$

D. Stratifié 10 plis

$$\sigma_{Von Mises} = 804.92 > \frac{\sigma_e}{s} = \frac{1266}{3} = 422MPA$$

E. Stratifié 8 plis

$$\sigma_{Von Mises} = 1092.2 > \frac{\sigma_e}{s} = \frac{1266}{3} = 422MPA$$

Avec σ_e : limite élastique.

S : coefficient de sécurité ; S =3 [21].

On remarque dans ces résultats la contrainte diminue avec la diminution l'épaisseur de chaque pli et l'augmentation des nombres de plis, et vice versa. et que le stratifié à 24 plis résiste mieux par rapport autres stratifiés.

4.4.2 L'influence des séquences d'empilement

Après les calculs des stratifiés précédentes, nous choisissons le meilleur résultat est (24plis $[20_3/90/22_3/90/28_3/90/40/56_3/90/62_3/90_4]$)

Alors, dans cette partie nous allons changer l'orientation et comparer les résultats.

Partie 2	Numéro des plis	Orientation	Epaisseur totale	Matériaux utilisés
1 ^{er} simulation	24	$[20_3/90/22_3/90/28_3/90/40/56_3/90/62_3/90_4]$	10.54mm	Carbone /Epoxy
6 ^{ème} simulation		$[0/45/-45/0/45/0]_{2S}$		
7 ^{ème} simulation		$[0/90/-90/0/90/0]_{2S}$		

Tableau (4.3) : séquences d'empilements

➤ **Simulation 6** : séquence 2

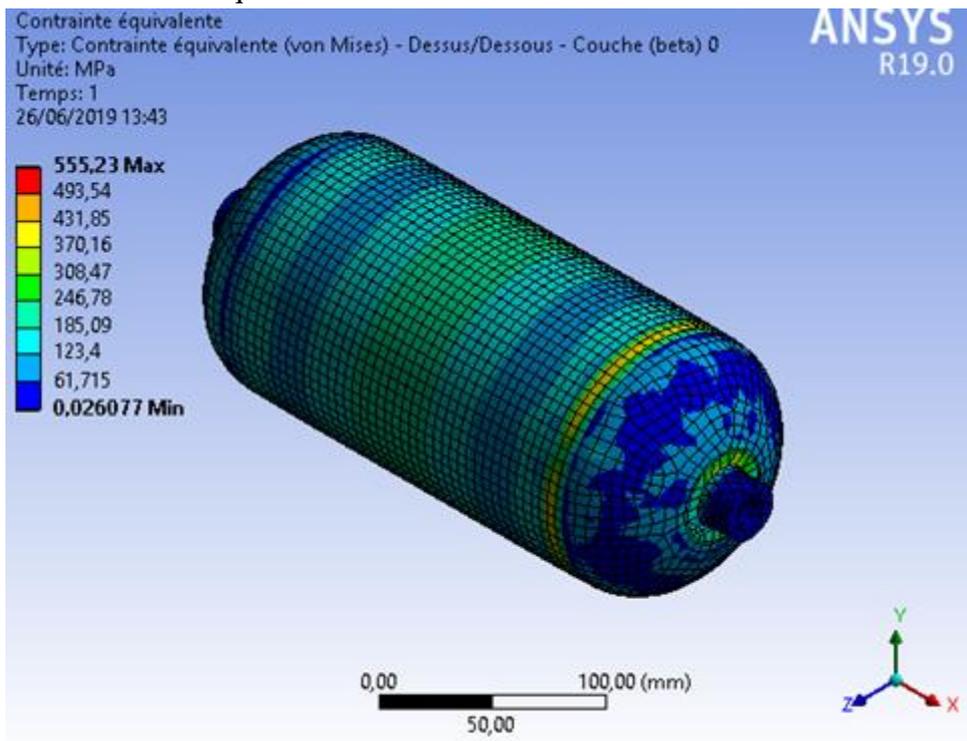


Figure (4.30) : Résultat de contraintes Von Mises

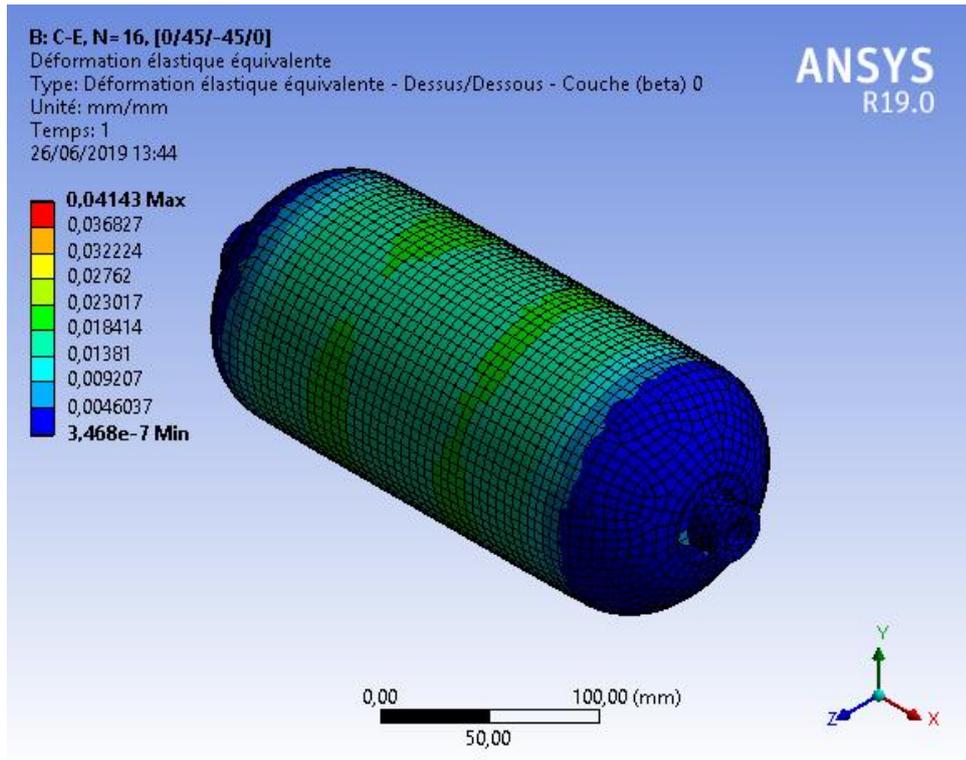


Figure (4.31) : Résultat de déformations

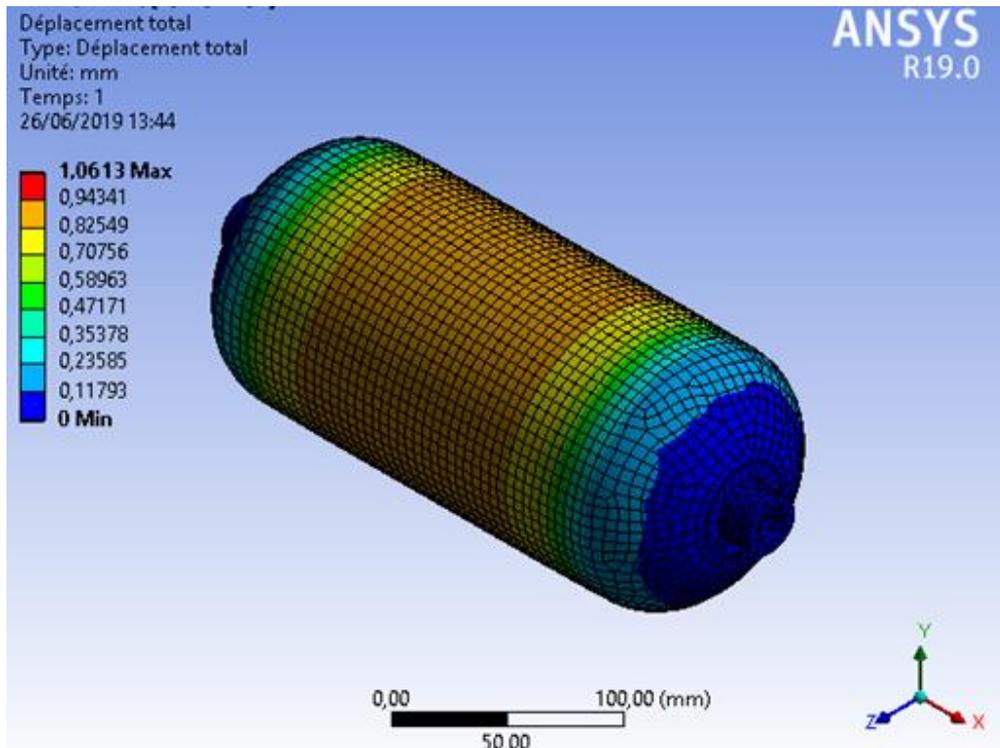


Figure (4.32) : Résultat de déplacements

- **Simulation 7** : séquence 3

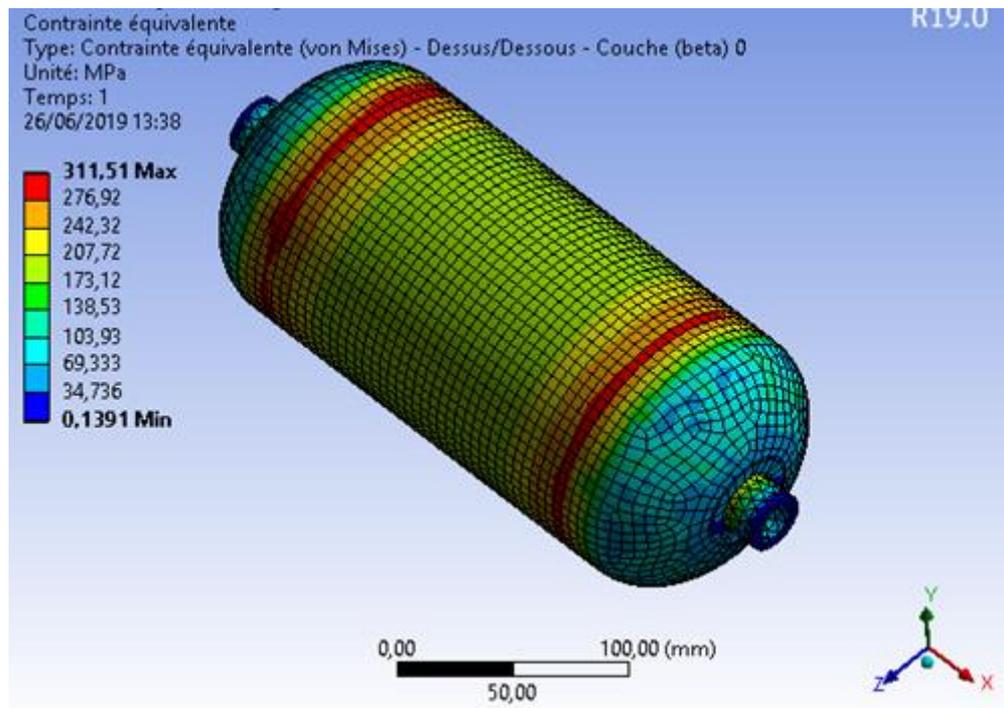


Figure (4.33) : Résultat de contraintes Von Mises

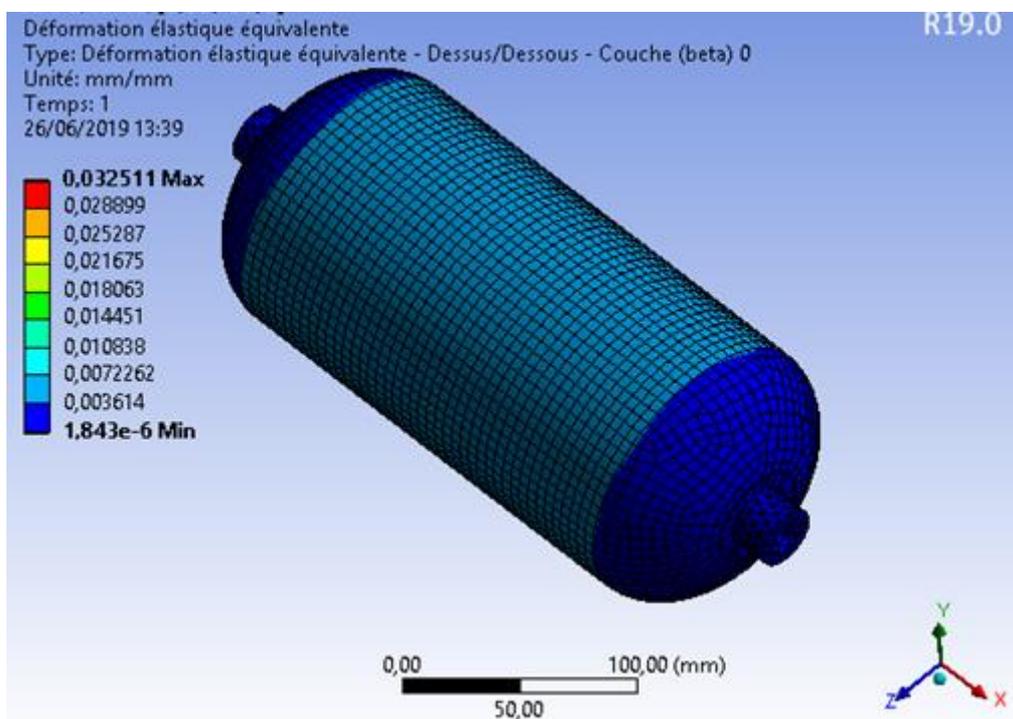


Figure (4.34) : Résultat de déformations

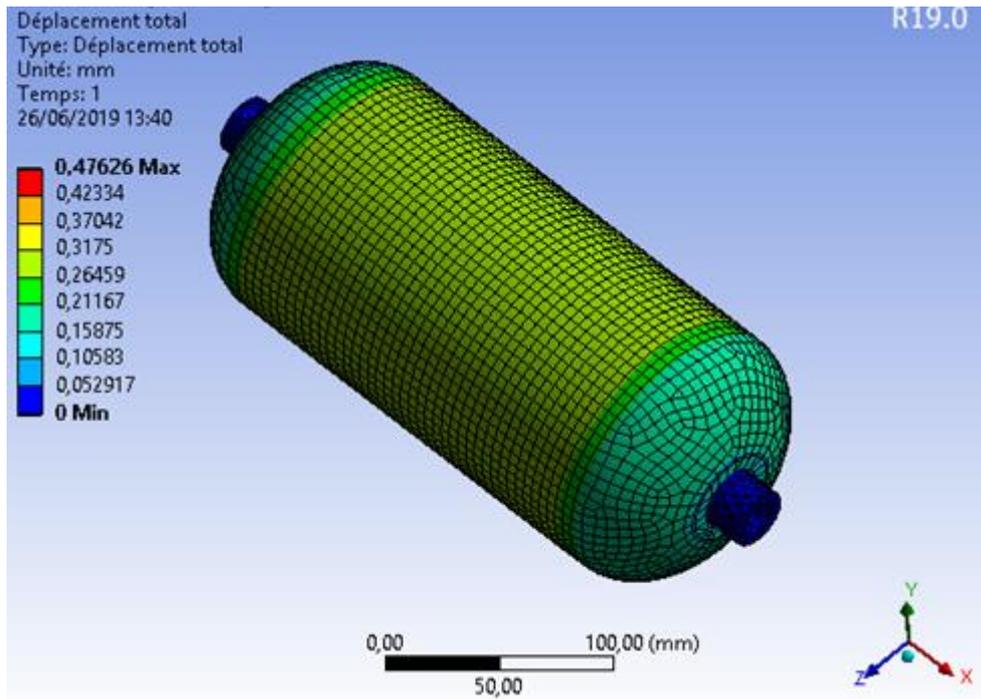


Figure (4.35) : Résultat de déplacements

	Résultat de contrainte de Von Mises (MPA)	Résultat de déformation	Résultat de déplacement (mm)
1^{er} simulation	329.74	0.04028	0.95522
6^{eme}simulation	555.23	0.04143	1.0613
7^{ème}simulation	311.51	0.032511	0.47626

Tableau (4.4) : Résultats des trois séquences

Les résultantes de ces simulations sont différentes, donc, dans ce cas le changement de l'orientation des fibres a influencé sur les résultats.

Il faut choisir la meilleure séquence d'empilement (séquence3) par rapport la contrainte maximale.

$$\sigma_e/s > \sigma_{Von Mises}$$

$$\frac{1266}{3} = 422 \text{ MPA} > 311.51 \text{ MPA}$$

La meilleure séquence d'empilement choisi est $[0/90/-90/0/90/0]_{2s}$.

4.4.3. L'influence des matériaux composites

Après l'affichage des résultats de toutes les simulations et choisir les meilleures séquences d'empilement. (24 plis et l'orientation $[0/90/-90/0/90/0]_{2s}$).

Dans ce cas, nous allons changer les matériaux composites.

Partie 3	Numéro des plis	Orientation	Epaisseur Totale	Les matériaux Composite
7 ^{ème} simulation	24	$[0/90/-90/0/90/0]_{2s}$	10.54	Carbone/Epoxy
8 ^{ème} simulation				Verre/Epoxy

Tableau (4.5) : les deux matériaux utilisés

- **Simulation 8** : matériau composite (Verre /Epoxy)

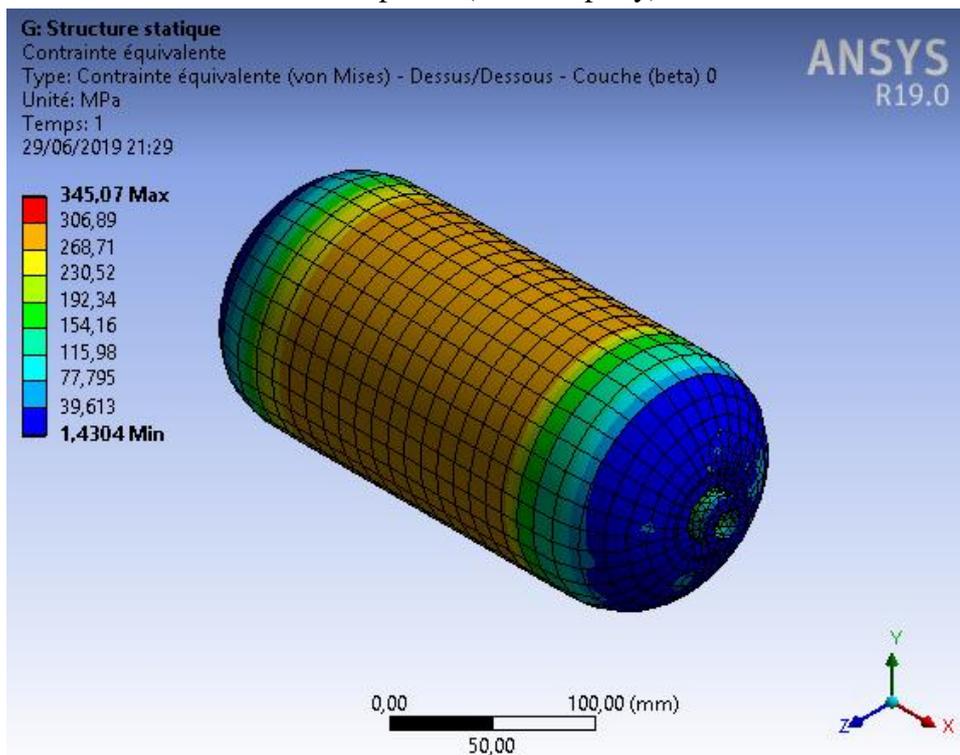


Figure (4.36) : Résultat de contraintes Von Mises.

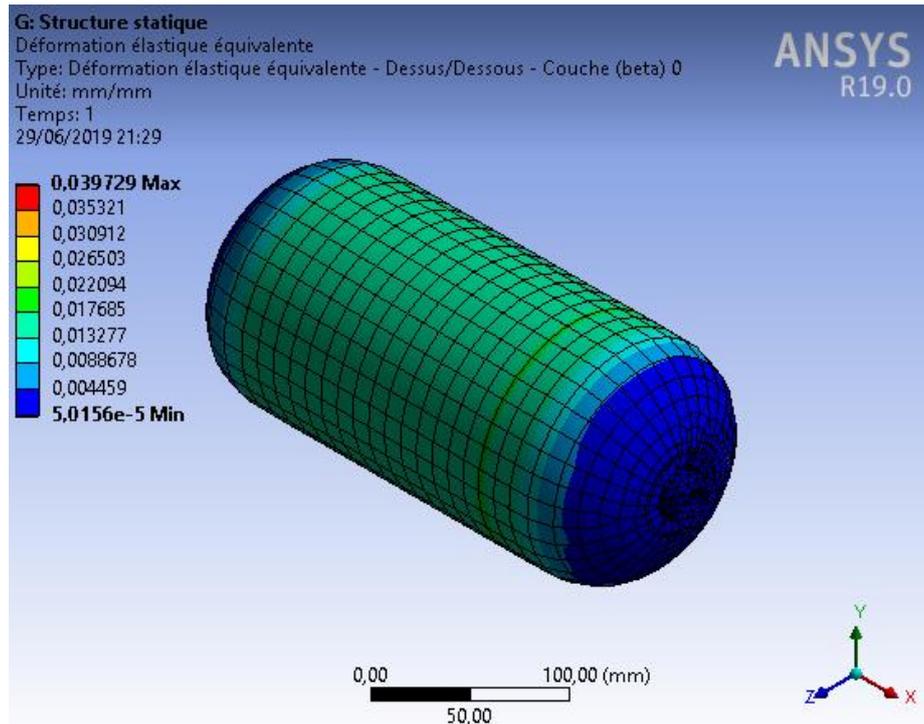


Figure (4.37) : Résultat de déformations

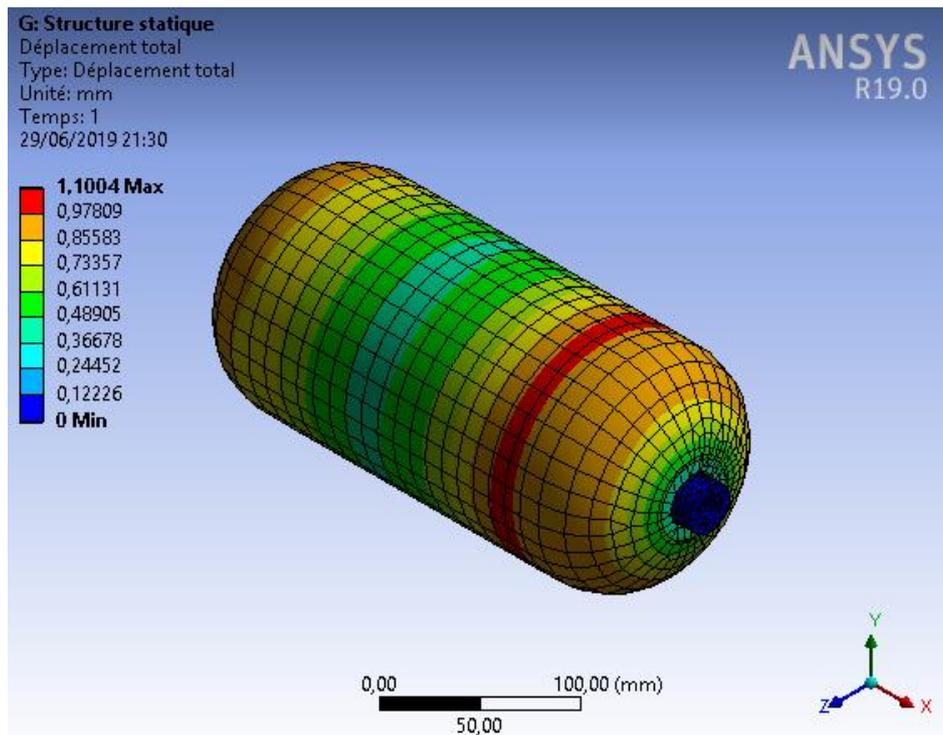


Figure (4.38) : Résultat de déplacements

	contrainte de Von Mises (MPa)	Déformation	déplacement (mm)
7 ^{ème} simulation	311.51	0.032511	0.47626
8 ^{ème} simulation	345.07	0.039729	1.1004

Tableau (4.6) deux matériaux

On remarque, d'après les résultats trouvés par ANSYS, que dans ce cas des réservoirs type IV, Le Carbone/ Epoxy résiste mieux que le Verre/Epoxy.

4.4.4. Stratifié hybride

Nous allons utiliser dans cette section un stratifié hybride de séquence d'empilement

$$[0_v/90_c/-90_v/0_c/90_v/0_c]_{2s}$$

Dans le but de voir l'influence des matériaux des fibres sur le comportement de réservoir.

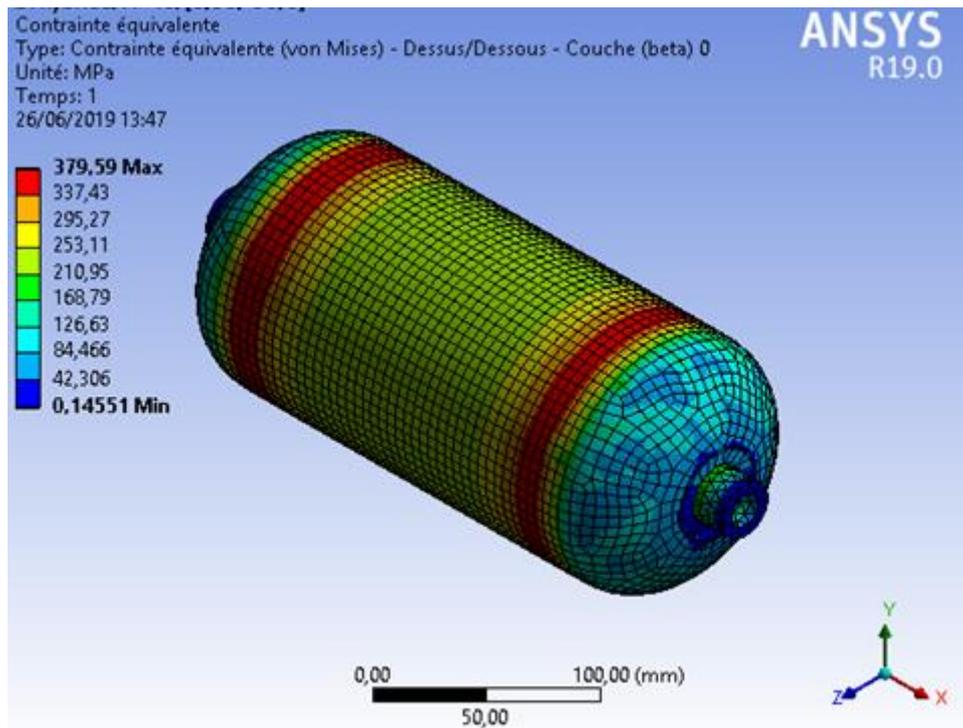


Figure (4.39) : Résultat de contraintes de Von Mises

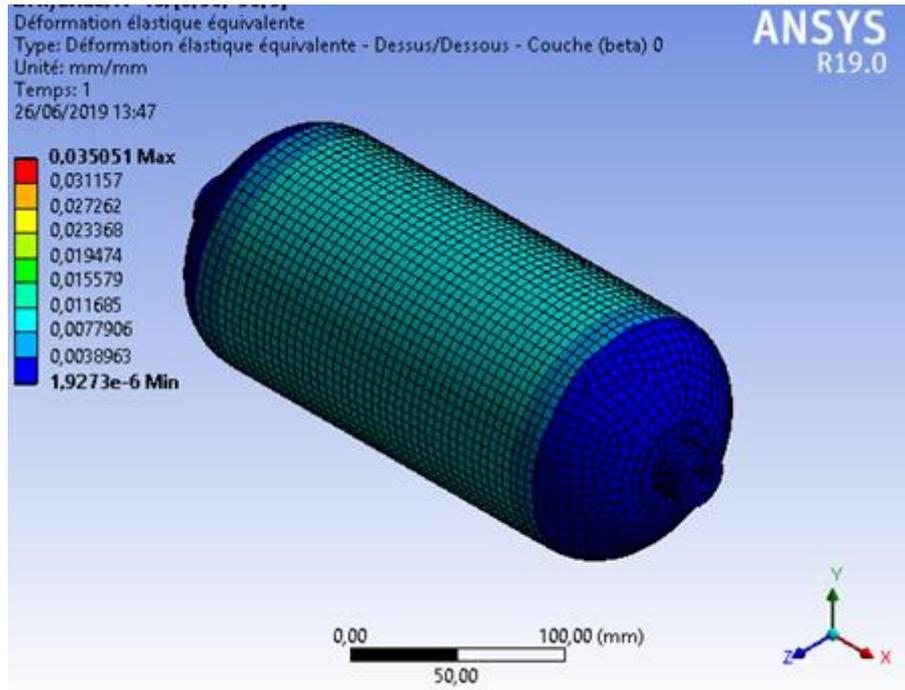


Figure (4.40) : Résultats de déformations

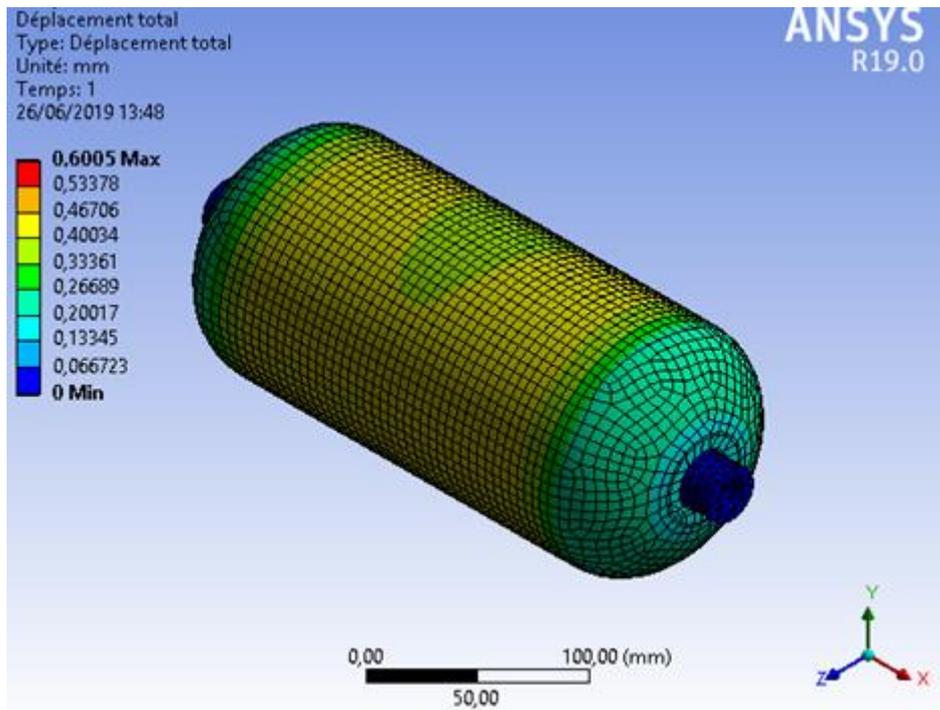


Figure (4.41) : Résultat de déplacements

	contrainte de Von Mises (MPa)	Déformation	déplacement (mm)
9^{eme}simulation	379.59	0.035051	0.6005

Tableau (4.7) stratifié hybride

La contrainte de Von Mises calculée est de 379.59 MPa ce qui implique que les stratifiés hybrides est moins résistantes par rapport aux autres stratifiés du carbone et du verre.

4.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objet d'une analyse numérique du réservoir de stockage de type IV, soumis à un chargement de pression interne.

Les résultats obtenus par l'utilisation des différents empilements composites dans la conception des réservoirs ont montré l'influence de l'orientation des fibres, le nombre de plis, l'épaisseur du stratifié et les matériaux composites utilisés sur le comportement mécanique du réservoir type IV.

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 VI destinés au stockage de l'hydrogène.

Dans un premier temps, il s'agissait de mettre en évidence une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures.

Le comportement mécanique et les propriétés physiques du composite ont d'abord été caractérisés. Les effets des séquences d'empilement, des évolutions des angles et des épaisseurs d'enroulement ont été étudiés.

Les résultats trouvés ont montré que :

- ✓ Le stratifié à 24 plis résiste mieux que les autres stratifiés ;
- ✓ La séquence d'empilement $[0/90/-90/0/90/0]_{2s}$ est meilleure en comparant avec les autres séquences étudiées dans ce travail ;
- ✓ Le Carbone/ Epoxy résiste mieux que le verre/Epoxy ;
- ✓ Les stratifiés hybrides est moins résistants par rapport aux autres stratifiés du carbone et du verre.

A la fin, nous espérons que ce travail ouvre une fenêtre et sera un support pour d'autres études sur les réservoirs de stockage de l'hydrogène.

Références Bibliographique

- [1] Baramee Patamaprohm, Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage de l'hydrogène. L'École nationale supérieure des mines de Paris 2014.
- [2] A. Hocine, D. Chapelle, Analyse expérimentale d'un réservoir de stockage d'hydrogène Rabat –Morocco 2009 these doctorat.
- [3] DAVID.LEH, optimisation de dimensionnement d un réservoir composite type IV pour stockage très haute pression d'hydrogène. Université de GRENOBLE.
- [4] Juan Pedro, Berro Ramírez, Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobinés. Application à la prédiction de l'éclatement des réservoirs bobinés hyperbares, L'école nationale supérieure de mécanique et d'aerotechnique 2013.
- [5] F.Baala, N. Ouhnane, Matériaux composite, université Ibn zohr-Agadire 24mai 2018.
- [6] 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.
- [7] DJEBLOUN Youcef, Généralité sur les matériaux composites, université de biskra.
- [8] Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, Ecole centrale de nantes.
- [9] Jean-Marie Berthelot, « Mécanique des Matériaux et Structures composites », Institut Supérieure des Matériaux et Mécanique Avancés, Le Mance, France.
- [10] A. Cherifi, M.Cherifi, Etude technologique d un réservoir de stockage type IV en matériaux composites université de blida 1 2015 /2016
- [11] M. Gomri, M. Belli, Etude et vérification d'un réservoir de stockage de carburant Université de Blida 1
- [12] Régis Chamayou, Réservoirs métalliques stockage des liquides à température ambiante, la Société Nouvelle des Constructions Métalliques de Provence
- [13] D. HALM, B. Magneville, J. Renard, Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène : bilan du projet Osirhys IV
- [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] Copyright NPROXX 2019 , Réservoirs sous pression de type 4
<https://www.nproxx.com/fr/capacites/reservoirs-sous-pression-de-type-4/>
- [16] N. Fabien, C.Thomas. Etude de l'endommagement de structures composites à matrice thermoplastique : application aux réservoirs de stockage hyperbare de l'hydrogène Ecole des Mines de Paris
- [17] Air Liquide 2019, Stocker l'hydrogène <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>
- [18] : AFHYPAC, Stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible
- [19] Hessen khelifi, Quels sont les avantages et les inconvénients de solidworks 2018
<https://fr.quora.com/Quels-sont-les-avantages-et-les-inconv%C3%A9nients-de-SolidWorks>
- [20] CADFEM, Ansys 2019 <https://www.cadfem.ch/fr/produits/ansys.html>
- [21] Collection H .Longeot et L .Jourdan, construction Industrielle. DUNOD, Paris, 1982.