

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes  
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de

## Master

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Hydrocarbure

**Option** : Génie mécanique-Mécanique des unités pétrochimiques

Présenté par :

-LASSEMEUR Khedidja  
-DEBBI Menel

THEME

**Calcul de vérification et de stabilité d'une colonne de distillation**

Soutenu publiquement le 29 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	<b>M. BETTAYEB</b>	<b>MCB</b>	UMBB
Examinateur	<b>Kh. SAHNOUNE</b>	<b>MCB</b>	UMBB
Examinateur	<b>R. BOUZID</b>	<b>MCB</b>	UMBB
Encadreur	<b>H. FERROUJI</b>	<b>MCB</b>	UMBB

Boumerdes 2024

---

## **Remerciement**

*Nous commençons par exprimer notre gratitude à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la volonté de mener à bien cette tâche.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Nous voudrions un premier temps remercier, notre encadrant Mr. Hicham FERROUDJI pour son soutien, sa patience et son expertise tout au long de ce projet.*

*Nous tenons ainsi à remercier chaleureusement les ingénieurs du complexe GP1Z Sonatrach, pour leurs efforts, leur aide, leur partage et explication, et leur présence tout le temps malgré leurs obligations professionnelles.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance envers tous les professeurs du département Transport et Équipements des Hydrocarbures pour leur engagement à nous offrir une formation de qualité.*

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous aimerions saisir cette opportunité pour exprimer nos plus sincères remerciements à nos familles et nos amis qui ont été à mes côtés tout au long ce parcours académique. Leur encouragement a été essentiel.*

***Menel et Khedidja***

## ***Dédicace***

*À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices.  
Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation.*

*À mes frères, Abdou et Walid*

*À ma grand-mère, pour ses prières, aussi à mon grand-père et à toute ma famille*

*À mes amis, pour les moments de détente et les beaux souvenirs.*

***Menel***

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail*

*A ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmené aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*A mon père, que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.*

*A mes frères, et à mes chères sœurs*

*A mon encadrant Mr. FERROUDJI Hicham*

*A tout ce que je connais sans exceptions*

*A tous mes enseignants sans exceptions*

*À mes amis proches qui m'ont accompagné tout au long ce parcours académique*

*Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail*

***Khedidja***

**Résumé :** L'objectif de cette étude est de concevoir une colonne de distillation de fractionnement afin d'évaluer sa résistance aux charges de pression et à la température maximale, conformément aux critères définis par l'ASME. Tout d'abord, un calcul analytique a été réalisé, suivi d'une modélisation numérique par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS. La conception géométrique de la colonne a été effectuée avec SolidWorks.

**Abstract:** The objective of this study is to design a fractionation distillation column to evaluate its resistance to pressure loads and maximum temperature, in accordance with ASME code. First, an analytical calculation was performed, followed by numerical modeling using the finite element method with ANSYS software. The geometric design of the column was carried out with SolidWorks.

**تلخيص:** الهدف من هذه الدراسة هو تصميم عمود تقطير تجزيئي لتقييم مقاومته للأحمال الضغطية ودرجة الحرارة القصوى، وفقاً للمعايير المحددة من قبل (ASME). أولاً، تم إجراء حساب تحليلي، تلاه نمذجة رقمية باستخدام طريقة العناصر المحدودة بواسطة برنامج (ANSYS). تم تنفيذ التصميم الهندسي للعمود باستخدام (SolidWorks).

# Sommaire

Introduction générale.....	1
État de l’art .....	2
Organisation de travail.....	4
<b>Chapitre I: Description du complexe GP1Z</b>	
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2 Présentation du complexe GP1Z.....</b>	<b>6</b>
I.2.1 Objectif.....	6
I.2.2 Historique .....	6
I.2.3 Organisation du complexe.....	7
I.2.4 Situation .....	10
I.2.5 Principales installations.....	10
I.2.6 Capacité.....	11
I.2.7 Alimentation de l’usine .....	11
I.2.8 Les utilités .....	12
I.2.9 Section de séparation GPL .....	13
<b>Chapitre II: Etude théorique</b>	
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>16</b>
<b>II.2 Classification des réservoirs sous pression.....</b>	<b>16</b>
II.2.1 Selon la géométrie.....	17
II.2.2 selon l’objectif .....	17
<b>II.3 Les composants d’un réservoir avec paroi mince sous pression .....</b>	<b>18</b>
II.3.1 Les fonds .....	18
II.3.2 La virole .....	20
II.3.3 Les tubulures .....	20
<b>II.4 La distillation.....</b>	<b>21</b>
II.4.1 Définition .....	21
II.4.2 Le principe de la distillation.....	21
II.4.3 Type de distillation .....	22

II.4.4	La distillation du pétrole brut en vue d'obtenir les produits intermédiaires .....	23
II.4.5	La colonne de distillation.....	25
II.5	Analyse des contraintes agissant sur un réservoir sous pression.....	<b>26</b>
II .5.1	Analyse des contraintes dans les appareils sous pression selon le code ASME .....	26
II.5.2	stress membranaire.....	28
II.5.3	Différentes contraintes dans la paroi.....	29
II.6	Présentation des logiciels de simulation.....	<b>30</b>
II.6.1	Le logiciel ANSYS.....	<b>30</b>
II.6.2	Logiciel SolidWorks.....	<b>32</b>
II.7	Méthode numérique « méthode des éléments finis » .....	<b>34</b>
II.7.1	Définition de la méthode des éléments finis.....	<b>34</b>
II.7.2	Principe de la Méthode des éléments finis (MEF) .....	<b>35</b>
II.7.3	Étapes logiques du calcul par éléments finis .....	<b>35</b>
II.7.4	Analyse par éléments finis .....	36
Chapitre III: Vérification de la stabilité de la colonne de fractionnement 32-V-7101		
III.1	Introduction.....	<b>41</b>
III.2	Définitions.....	<b>41</b>
III.2.1	Les contraintes agissant sur la colonne.....	41
III.2.2	La pression maximale admissible.....	42
III.2.3	La température de design.....	42
III.2.4	L'épaisseur minimale requis.....	42
III.3	L'essai hydrostatique.....	43
III.4	La colonne de fractionnement 32-V-7101 complexe GP1Z .....	<b>43</b>
III.4.1	Dimensionnement et conditions de fonction de colonne de fractionnement 32-V-7101 .....	43
III.5	Calcul des contraintes.....	<b>45</b>
III.5.1	La contrainte admissible.....	<b>46</b>
III.5.2	Calcul des contraintes membranaires .....	<b>46</b>
III.5.2.1	Le fond supérieur.....	46
III.5.2.2	Le fond inférieur.....	46
III.5.2.3	La virole.....	46
III.6	Calcul de l'épaisseur minimale requis .....	<b>47</b>

III.6.1 La virole .....	47
III.6.2 Le fond supérieur .....	48
III.6.3 Le fond inférieur.....	48
III.7 La pression de travail maximale admissible .....	49
III.7.1 La virole .....	49
III.7.2 Le fond supérieur .....	49
III.7.3 Le fond inférieur.....	50
III.8 Calcul de moment de vent.....	50
III.8.1 Calcul de la poussée du vent .....	51
III.9 L’essai hydrostatique.....	56
III.9.1 La résistance du fond inférieur lors de l’essai hydrostatique .....	56
III.9.2 Calcul de pression hydrostatique.....	57
III.9.3 La contrainte maximale au fond inférieur .....	57

#### Chapitre IV: Modélisation de la colonne de fractionnement 32-V-7101

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Modélisation par SolidWorks .....	58
IV.3 Modélisation de la colonne à fond elliptique .....	59
IV.3.1 Modélisations des fonds de la colonne .....	59
IV.3.2 Modélisation des viroles de la colonne .....	61
IV.3.3 Assemblage .....	62
IV.4 Modélisation de la colonne avec différents fonds.....	63
IV.4.1 Modélisation de la colonne à fond hémisphérique.....	63
IV.4.2 Modélisation de la colonne à fond Tori-sphérique .....	64
IV.5 Les étapes de la simulation .....	65
IV.5.1 La première étape.....	65
IV.5.2 La deuxième étape .....	66
IV.5.3 La dernière étape .....	67

#### Chapitre V: Analyse des résultats

V.1 Introduction .....	70
V.2 Le choix du maillage .....	70
V.3 Evaluation de la contrainte circonférentielle par simulation.....	72



V.3.1 Simulation des contraintes agissants sur les parois des différentes parties de la colonne ainsi que l'essai hydrostatique.....	<b>72</b>
V.3.2 Interprétation .....	77
V.3.3 Validation des résultats .....	77
V.4 Simulation et interprétation des résultats .....	79
V.4.1 En absence de la température .....	79
V.4.2 En présence de la température.....	<b>86</b>
V.4.2.4 Interprétation des résultats .....	93
Conclusion générale .....	<b>97</b>

## Liste des figures

Figure I 1-Les Trains dans Complexe GP1Z .....	7
Figure I 2-organigramme du complexe .....	8
Figure I 3-Plan de masse du complexe.....	11
Figure I 4-Carte géographique d'alimentation des complexes du GPL .....	12
Figure I 5-Schéma synoptique du complexe GP1Z.....	14
Figure II 1-classification des réservoirs sous pression .....	16
Figure II 2-les composants d'un réservoir sous pression .....	18
Figure II 3-Les différents types des fonds .....	20
Figure II 4-Le principe de la distillation simple .....	22
Figure II 5-le principe de la distillation fractionnée.....	23
Figure II 6-l'opération de la distillation atmosphérique .....	24
Figure II 7-Les différentes contraintes appliquées sur la paroi de l'équipement .....	29
Figure II 8-la contrainte radiale.....	29
Figure II 9-Les étapes de l'analyse par éléments finis .....	36
Figure II 10-Les types des éléments utilisés par le logiciel ANSYS .....	38
Figure IV 1-La création du dessin de la virole par les différents outils de SolidWorks .....	58
Figure IV 2-Modélisation du fond supérieur par SolidWorks .....	60
Figure IV 3-Modélisations du fond inférieur par SolidWorks .....	60
Figure IV 4-Modélisation de la virole supérieure par SolidWorks .....	61
Figure IV 5-Modélisation de la virole conique par SolidWorks .....	61
Figure IV 6-Modélisation de la virole inférieure par SolidWorks .....	62

Figure IV 7-L'assemblage de la colonne à fond elliptique .....	62
Figure IV 8-Modélisation du fond hémisphérique par SolidWorks.....	63
Figure IV 9-L'assemblage de la colonne à fond hémisphérique.....	64
Figure IV 10-Modélisation du fond Tori sphérique par SolidWorks.....	65
Figure IV 11-L'assemblage de la colonne à fond Tori sphérique .....	65
Figure IV 12-L'onglet d'ouverture des programmes static structural et steady-state thermal.	66
Figure IV 13-Le choix du matériau dans ANSYS Workbench.....	66
Figure IV 14-L'ajout des conditions : support fixe-pression-température.....	67
Figure IV 15-Les résultats de la simulation .....	68
Figure IV 16-Schéma des étapes de simulation par le logiciel ANSYS .....	68
Figure V 1-Graphe du choix optimal de maillage	71
Figure V 2-Propriétés de maillage.....	71
Figure V 3-Maillage de la colonne à fond elliptique .....	72
Figure V 4-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond supérieur .....	72
Figure V 5-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole supérieure.....	73
Figure V 6-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole conique.....	73
Figure V 7-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole inférieure.....	74
Figure V 8-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond inférieur .....	74
Figure V 9-Pression hydrostatique appliquée sur l'intérieur de la colonne.....	75
Figure V 10-Conditions de l'essai hydrostatique.....	75
Figure V 11-Contrainte maximale à l'intérieur de la colonne.....	76
Figure V 12-Contrainte maximale l'extérieur de la colonne.....	76
Figure V 13-Diagramme de comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations .....	78

Figure V 14-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond elliptique en absence de la température.....	80
Figure V 15-déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en absence de la température .....	80
Figure V 16-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond hémisphérique en absence de la température .....	82
Figure V 17-déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en absence de la température.....	82
Figure V 18-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température .....	84
Figure V 19-déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température.....	84
Figure V 20-Variation de contrainte en absence de température .....	85
Figure V 21-Variation de déplacement totale en absence de température .....	86
Figure V 22-Contrainte maximale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température.....	88
Figure V 23-Déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température.....	88
Figure V 24-Contrainte maximale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température.....	90
Figure V 25-Déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température.....	90
Figure V 26-Contrainte maximale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure V 27-Déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure V 28-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=1,98MPa .....	93

Figure V 29-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=2,35MPa .....	94
Figure V 30-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=3,53MPa .....	94
Figure V 31-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante P=1,98MPa.....	95
Figure V 32-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante P=2,35MPa.....	95
Figure V 33-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante P=3,53MPa.....	96

## Liste des tableaux

Tableau III 1-Dimensions et conditions de fonctionnement de la colonne .....	43
Tableau III 2-Les propriétés du matériau SA-516M Gr485.....	45
Tableau V 1-le choix optimal de maillage	70
Tableau V 2-Les résultats de la simulation .....	77
Tableau V 3-Comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations .....	78
Tableau V 4-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en absence de température.....	79
Tableau V 5-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température .....	81
Tableau V 6-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température .....	83
Tableau V 7-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en présence de température .....	87
Tableau V 8-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en présence de température.....	89
Tableau V 9-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond Tori sphérique en présence de température.....	91

## Nomenclatures

<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers
<b>[B]</b>	Matrice des dérivées partielles des coefficients de pondération
<b>BPVC</b>	Boiler and pressure vessel code
<b>D</b>	Diamètre de la colonne
<b>[D]</b>	matrice d'élasticité
<b>E</b>	Module de Young MPA
<b>MEF</b>	Méthode des éléments finis
<b>g</b>	l'accélération de pesanteur = 9.81 m/s <sup>2</sup>
<b>h</b>	Hauteur des fonds
<b>[K]</b>	la matrice de rigidité
<b>L</b>	Longueur de la colonne
<b>N</b>	fonctions de formes
<b>N</b>	Facteur de sécurité
<b>P<sub>c</sub></b>	Pression intérieur de constricteur
<b>P</b>	<i>essai</i> Pression d'essai hydrostatique
<b>P<sub>st</sub></b>	Pression de l'eau contenue dans la colonne.
<b>P<sub>s</sub></b>	Pression de service
<b>q<sub>e</sub></b>	vecteur formé de l'ensemble des déplacements nodaux
<b>R</b>	Rayon de la colonne
<b>t</b>	Epaisseur
<b>t<sub>c</sub></b>	Epaisseur de constricteur
<b>T<sub>c</sub></b>	Température de calcul
<b>ρ</b>	Densité de liquide utilisé dans le test hydrostatique

## Nomenclatures

$\sigma_L$	contrainte longitudinale
$\sigma_H$	contrainte circonférentielle
$\sigma_r$	contrainte radiale
$\sigma_a$	Contrainte admissible
$\sigma_{etc}$	Limite élastique dans la température de calcul
$\Sigma_{\text{fond}}$	Contrainte dans le fond inférieur
$\epsilon$	Déformation
<b>MAWP</b>	la pression maximale admissible
<b>MDMT</b>	Température maximale de calcul
<b>K<sub>i</sub></b>	Coefficient aérodynamique
<b>Re</b>	Nombre de Reynold
$\mathcal{V}_{\text{air}}$	La vitesse du vent (air),
<b><math>\Theta_i</math></b>	Coefficient de surcharge qui dépend de H
<b><math>\beta_i</math></b>	Coefficient d'augmentation de la poussée spécifique
<b>mi</b>	Coefficient de pulsation du vent
$\epsilon$	Coefficient de dynamique
<b>Q<sub>max</sub></b>	Charge maximal
<b>I</b>	Moment d'inertie
<b>S<sub>i</sub></b>	La surface face au vent
<b>P<sub>i</sub></b>	L'effort du vent
<b>X<sub>i</sub></b>	Distance de chaque section



### Introduction générale

Un récipient sous pression avec paroi mince est défini comme un conteneur où il existe une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, la pression intérieure étant généralement plus élevée que celle de l'extérieur. Ces réservoirs sont couramment utilisés dans les champs pétroliers, les raffineries et diverses autres industries pour traiter et stocker des fluides sous pression. Ils se caractérisent par une pression interne généralement supérieure à la pression externe, sauf dans des situations isolées. Parmi les équipements les plus couramment utilisés figurent les colonnes de distillation, qui facilitent les échanges de matière et d'énergie entre les phases gazeuse et liquide.

Les colonnes de distillation sont parmi les équipements les plus utilisés dans diverses industries pour faciliter les échanges de matière et d'énergie entre les phases gazeuse et liquide. Leur rôle est crucial, que ce soit pour permettre aux fluides de changer d'état, comme dans les chaudières à vapeur, ou pour les combiner avec d'autres réactifs, comme dans les usines chimiques. Malgré leur importance, ces colonnes présentent également des dangers, avec des accidents mortels tout au long de leur histoire. C'est pourquoi leur conception, leur fabrication et leur utilisation sont strictement réglementées par les autorités techniques.

Les réservoirs sous pression, qui incluent également les colonnes de distillation, sont vitaux pour le traitement, le transport et le stockage de liquides et de gaz sous pression. Leur construction est soigneusement réalisée pour éviter les explosions qui pourraient causer des pertes humaines et matérielles importantes. Fabriqués à partir de matériaux fragiles comme la fonte ou de matériaux ductiles comme le fer ou l'acier doux, ces réservoirs subissent une charge de pression lorsque soumis à une pression interne, entraînant des contraintes dans toutes les directions.

En raison des pressions internes et de la dissipation de chaleur, des charges mécaniques importantes, telles que la pression et la température, agissent sur les colonnes de distillation, en plus du poids propre et des charges environnementales comme le vent et le séisme. Ces diverses charges génèrent des contraintes élevées, en particulier dans les zones critiques comme la buse. La magnitude des contraintes normales résultantes dépend du rayon de l'élément considéré

En tenant compte de toutes les informations présentées précédemment, notre décision a été de mener une étude sur les contraintes affectant la colonne de fractionnement 32-V-7101 du complexe GP1Z. Cette analyse se basera sur diverses méthodes analytiques et numériques, notamment la méthode des éléments finis. L'objectif est d'assurer que cette colonne résiste aux conditions de travail maximales, notamment en ce qui concerne la pression et la température.

### État de l'art

Plusieurs recherches précédentes se sont concentrées sur les performances des réservoirs sous pression et leur comportement sous diverses conditions et paramètres, tels que la température interne et externe du réservoir, ainsi que la pression du fluide à l'intérieur et la pression externe.

Ces recherches reposent sur l'analyse par la méthode des éléments finis (MEF).

De nombreux chercheurs ont examiné l'impact des dimensions, des matériaux de construction, de la pression maximale admissible et des caractéristiques de conception des réservoirs sous pression. La plupart de ces recherches se sont concentrées sur des structures cylindriques avec des fonds elliptiques ou hémisphériques, car ce sont les géométries les plus courantes et les plus utilisées dans les applications industrielles à grande échelle, notamment dans le secteur pétrolier, tout en étant plus économiques. Ainsi, nous pouvons référencer des articles de recherche pertinents en lien avec notre étude actuelle.

Alors, on peut donner des articles de recherche qui sont discutées en relation avec notre présent travail.

**Bhagat Meghraj Vitthal (2010) [1]** : Il a réalisé une analyse par éléments finis pour calculer les déformations et les contraintes à chaque nœud.

Il a comparé les plages bilinéaires et quadratiques pour un même nombre d'éléments. Il a constaté que la plage bilinéaire présentait une bonne variation, tandis que la plage quadratique montrait une mauvaise variation par rapport aux valeurs exactes.

Pour un même type d'élément avec un nombre différent d'éléments, les résultats étaient conformes aux attentes, c'est-à-dire qu'ils convergent vers les valeurs exactes à mesure que le nombre d'éléments augmente.

**Bandarupalli Praneethetal (2012) [2]** : l'analyse par éléments finis pour examiner les appareils sous pression, en étudiant les contraintes développées dans ces appareils à la fois en monocouche et en multicouches.

Les résultats théoriques sont comparés à ceux obtenus avec ANSYS. En conclusion, les valeurs théoriques calculées se rapprochent étroitement de celles obtenues avec ANSYS, démontrant que les contraintes développées dans les réservoirs sous pression multicouches sont plus élevées que celles des réservoirs à couche solide.

**Tapan Majumder (2014) [3]:** Les cylindres multicouches sont adaptés aux pressions de fonctionnement élevées. Les résultats montrent que, dans des conditions optimales, la contrainte sur les surfaces intérieures de tous les cylindres atteint la limite d'élasticité des matériaux utilisés pour les cylindres multicouches. L'utilisation de réservoirs multicouches permet d'économiser des matériaux par rapport aux réservoirs à paroi pleine. Cela réduit non seulement le poids du cylindre multicouche, mais aussi le coût des matériaux nécessaires à sa fabrication.

**Chandrakant R Kini (2015) [4]:** En utilisant l'analyse FEA et une approche analytique, il a calculé la contrainte équivalente maximale (contrainte de Von Mises) et a également élaboré un modèle tridimensionnel de la contrainte équivalente.

Lors de l'analyse par éléments finis, il a constaté des écarts entre les deux résultats.

La contrainte équivalente maximale obtenue pour le modèle tridimensionnel conçu était inférieure à la limite d'élasticité du matériau SA 283 C, soit 132,97 MPa par rapport à 245 MPa. Cela démontre que la conception de l'appareil sous pression était correcte et que le modèle tridimensionnel pouvait résister aux pressions et aux températures de fonctionnement.

**Pratama (2020) [5]:** Ils ont conçu un modèle d'un réservoir sous pression vertical à paroi mince en acier au carbone, puis ont procédé à une analyse par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS pour évaluer sa résistance structurelle. Ils ont conclu que la limite d'élasticité d'un matériau peut servir à évaluer sa susceptibilité à la défaillance.

## Objectif de ce travail

Le projet que nous avons mené dans le cadre de l'obtention de notre diplôme de master en mécanique des unités pétrochimiques avait pour objectif d'étudier la résistance et les différentes contraintes exercées sur la colonne de fractionnement 32-V-7101, en fonction des variations des fonds et des conditions opératoires (pression et température), en utilisant le logiciel ANSYS ainsi que des calculs analytiques. En parallèle, la résistance de la colonne aux poussées de vent et au test hydrostatique a été examinée.

## Organisation de travail

Pour réaliser notre travail, le mémoire a été structuré en quatre chapitres :

- **Introduction générale** : Présente une vue d'ensemble des réservoirs sous pression et des différentes recherches associées à notre étude.
- **Chapitre I : Description du complexe GP1Z**
- **Chapitre II : Etude théorique (Généralités sur les réservoirs sous pression)** : Décrit les différents types de réservoirs les plus couramment utilisés, en particulier les colonnes de distillation. Ce chapitre couvre également les logiciels utilisés, l'analyse des différentes contraintes selon le code ASME, ainsi que des informations générales sur l'intelligence artificielle.
- **Chapitre III : Vérification de la stabilité de la colonne de fractionnement 32-V-7101** : Effectue un calcul analytique des contraintes appliquées sur chaque partie de la colonne, détermine l'épaisseur minimale requise des parois et la pression maximale admissible selon le code ASME, en prenant en compte l'essai hydrostatique et les charges de vent.
- **Chapitre IV : Modélisation de la colonne de fractionnement 32-V-7101** : Considère différentes conditions opératoires de pression et de température.
- **Chapitre V : Analyse des résultats** : Présente les résultats obtenus de nos simulations numériques concernant l'influence des conditions opératoires (pression et température) sur différents types de fonds. Une comparaison entre les calculs analytiques et les résultats numériques est également effectuée.
- **Conclusion générale** : Résume les principaux résultats et conclusions de notre travail.

## **Chapitre I**

# **DESCRIPTION DU COMPLEXE GP1Z**

## **I.1 Introduction**

Le gaz de pétrole liquéfié connu sous le nom de GPL est obtenu à partir de pétrole brut après une distillation atmosphérique ou dans des champs de production du gaz naturel par utilisation de procédés de fractionnement, son origine le gaz de pétrole liquéfié est un mélange d'hydrocarbures à teneurs variables en légers. Et à la température et pression atmosphériques, il est gazeux, mais peut être liquéfié à température ambiante sous une pression modérée.

Le GPL n'a pas de propriétés lubrifiantes, il est incolore en phase vapeur, cependant quand le liquide est évaporé, l'effet de refroidissement de l'air d'environnement peut causer une condensation et même une congélation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ce qui permet de rendre visible un espace de GPL.

Le GPL est pratiquement inodore et pour des raisons de détection et de sécurité, un odorant doit être ajouté dans des limites déterminées afin de le commercialiser.

## **I.2 Présentation du complexe GP1Z**

### **I.2.1 Objectif**

Important complexe, construit dans la zone industrielle d'ARZEW dans le but de traiter le mélange brut GPL, afin de produire du propane commercial et du butane commercial

### **I.2.2 Historique**

Le complexe de Production GPL dénommé GP1Z ou " JUMBO GPL " de l'Entreprise Nationale SONATRACH est le dernier né des Ensembles Industriels de la zone d'Arzew. Il est situé entre la Centrale Thermique Mers El Hadjadj à l'Est et les Complexes de GNL à l'Ouest.

Le " JUMBO GPL " s'étend sur une surface de 120 hectares sur la bande de terre comprise entre la Route National 11 et le Bord de la Mer Méditerranée.

Le contrat de construction passé avec « IHI-C-ITOH JAPON » le 11 Décembre 1978.

En 1983 le complexe disposait de quatre trains de traitement GPL qui lui permettait de produire 4.8 millions de tonnes par an et suite à une acquisition de deux trains supplémentaires (extension du complexe en 1998) cette production a augmenté pour atteindre 7,2 millions de tonnes par an. Après le démarrage de la troisième phase, la production est estimée à 10,8 millions de tonnes par an.

Le contrat de construction passé avec « IHI-C-ITOH JAPON » le 11 Décembre 1978.

- L'ouverture du chantier le 10 Octobre 1980.
- L'inauguration officielle le 31 Décembre 1983.
- Le chargement du premier navire de propane réfrigéré le 20 Février 1984.
- L'extension du complexe :
  - Phase II le 24 Février 1998. (Deux trains)
  - Phase III 24 Février 2010 (trois trains)



Figure I 1-Les Trains dans Complexe GP1Z

### I.2.3 Organisation du complexe

L'organisation du complexe GP1Z est étudiée de façon à avoir une coordination complète entre les différentes structures de l'usine afin de permettre une exploitation optimale des ressources disponibles. Le suivi est assuré par quatre équipes dont une au repos ainsi que par le personnel de maintien travaillant en journées normales.

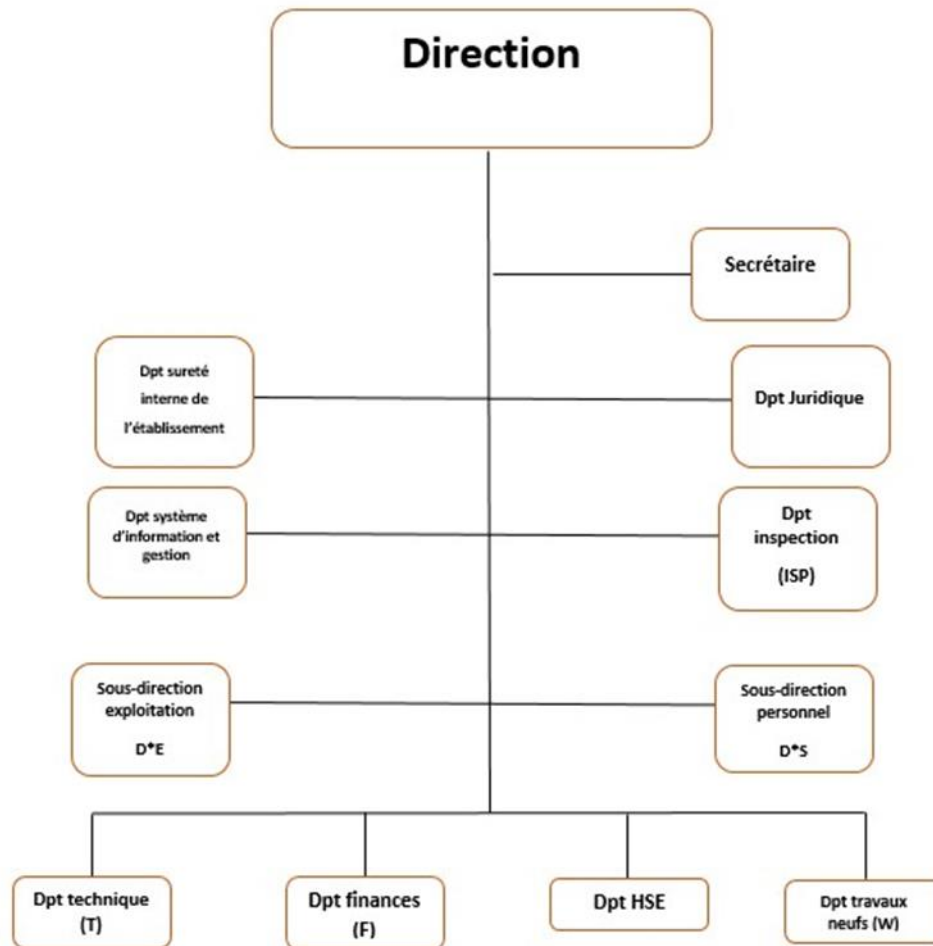


Figure I 2-organigramme du complexe

- **La direction** : c'est une structure qui veille à la bonne gestion du complexe et ses différents départements, d'après l'organigramme les départements de contrôle liés directement à la direction sont : le département technique (T), le département finances (F), le département HSE et le département des travaux neufs (W).
  - **La Sous-direction Exploitation** : Elle comporte les départements d'exploitations : département production (P), département maintenance (G)
  - **La Sous-direction Personnel** : Cette direction est responsable des départements suivants : Ressources humaines (DRH), moyens généraux (MOG).
- **Département Sécurité** : Ce département joue un rôle très important afin d'assurer la sécurité au niveau du complexe surtout que ce dernier est exposé au danger à tout moment.



Le département est composé ainsi :

- Service intervention
  - Service prévention
  - Service environnement
- **Département Maintenance (G) :** Le rôle de ce département est d'entretenir l'équipement du complexe pour le maintenir en bon état (en premier lieu le dpt. Production). Pour cela il se base sur la performance de différents spécialistes qui occupent les différents services de ce département.
- **Département technique (T) :** Le département technique dépend hiérarchiquement de la direction du complexe, c'est l'interphase entre l'intérieur et l'extérieur, sa mission principale consiste à étudier les projets d'installation, le suivi des paramètres de fonctionnement et le contrôle de qualité des équipements ainsi que les utilités et produits finis.
- **Département Finances (F) :** Le département finances est chargé de :
- Suivre toutes les opérations financières et juridiques au sein du complexe.
  - Fournir l'information de gestion.
  - Le contrôle budgétaire.
- **Département travaux neufs (W) :** C'est un département nouvellement créé dans le but de l'extension du complexe et de sa rénovation, son rôle est de réaliser les différents petits projets, il gère les deux types de projets liés à la production et non lié à la production.
- **Département Inspection (ISP) :** Ce département a pour tâche d'inspecter les équipements techniques, il veille à la surveillance de toutes les machines et s'assure de leur fonctionnement optimal et du suivi des travaux de maintenance.
- **Département Production (P) :** Le département production dépend de la sous-direction exploitation, ce département gère toute la production de GPL (propane et butane) et il contient trois services : service Fabrication, Stockage et Planification.
- **Département moyens généraux (MOG) :** Ce dernier est chargé des activités de soutien, c'est à dire : le transport, la restauration, l'hygiène ainsi que l'entretien général du complexe.
- **Département ressources humaines (DRH) :** L'objectif de ce département est la formation du personnel et la gestion de sa carrière pour un meilleur fonctionnement du complexe.

### **I.2.4 Situation**

D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERS EL HADJAJ) à l'EST et le complexe GL/Z à l'OUEST, entre la mer méditerranée et la route nationale N°1.1

### **I.2.5 Principales installations**

- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m<sup>3</sup> chacune.
- 09 Trains de traitement du GPL.
- 02 Unités de reliquéfaction du gaz évaporé.
- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacun.
- 04 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacun.
- 04 Sphères de stockage de produits à température ambiante (propane et Butane) de 500 m<sup>3</sup> chacune.
- 01 Sphère de stockage gazoline.
- 02 Salles de contrôle.
- 01 Sous-station électrique alimentée par la SONEGAS.
- 04 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe en cas de coupure de courant.
- 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variante entre 4000 et 10000 tonnes.
- Une rampe de chargement de camions.
- Une station de pompage d'eau de mer pour le réseau d'incendie.
- Un système de télésurveillance.



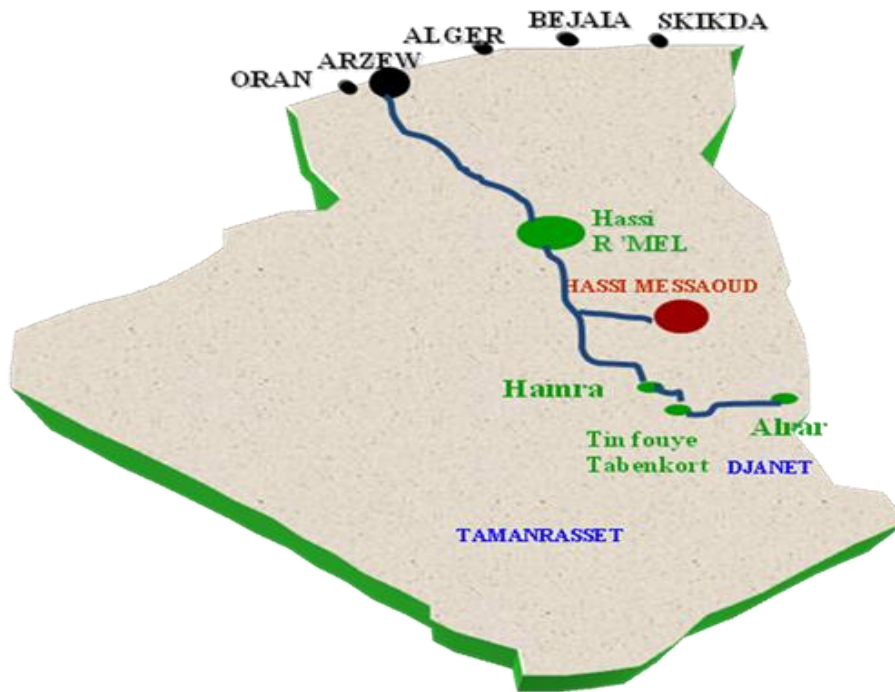


Figure I 4-Carte géographique d'alimentation des complexes du GPL

### I.2 .8 Les utilités

Elle alimente les diverses zones de production en :

- Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.
  - Air : elle est divisée en deux :
    - Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
    - Air service : C'est du l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien.
- Vapeur : On utilise le dessaleur pour avoir l'eau distillée et à partir de la chaudière on produit de la vapeur.

- Eau :
  - L'eau distillée
  - L'eau de refroidissement
  - L'eau potable.
- Méthanol : Il est utilisé pour le dégivrage.
- Gasoil : Il est utilisé pour les générateurs de secours.
- Azote : Ballon d'azote, il y'a deux circuits
- Circuit Gazeuse (HELIOS) ;
- Circuit l'azote liquide (COGIZ) : On le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements.

### **I.2.9 Section de séparation GPL**

Une fois déshydraté, le GPL entre dans la section de séparation comme alimentation du fractionner. Avant son entrée au fractionner il doit être porté à son point de bulle (71 °C) lors d'un passage à travers trois réchauffeurs. Le GPL récupère d'abord la chaleur du propane sortant du fond du dééthaniseur dans le préchauffeur N° 1. Il y a une deuxième récupération à travers le préchauffeur N° 2 cette fois-ci sur le produit du fond du fractionner, finalement le GPL est amené à son point de bulle dans le préchauffeur N°3, qui fait appel au fluide caloporteur (huile TORADA-TC 32).

Le GPL ainsi préchauffé passe directement dans le fractionnateur, où il est séparé en butane, produit de fond de colonne et en propane, produit de tête. La colonne qui comprend 55 plateaux à clapets est munie de deux rebouilleurs et d'aérocondenseurs.

Les produits de tête du fractionnateur sont condensés à travers les aéro-réfrigérants, récupérés au niveau du ballon de reflux, puis aspirés et refoulés par le biais de la pompe de reflux. Une partie est renvoyée vers la colonne comme reflux pour purifier et refroidir les produits de tête, l'autre partie est envoyée vers le dééthaniseur si elle contient une teneur en éthane dépassant les 2 %. Dans la mesure du contraire, elle va être refroidie au niveau des aéro-réfrigérants, puis envoyée vers la section de réfrigération.

Les produits de fond de colonne vont en premier lieu préchauffer la charge au niveau du second préchauffeur, ensuite être refroidis à travers les aérocondenseurs, pour être canalisés vers la section de réfrigération

Si la teneur maximale en C5 dans le C4 est de 1,75 %, les produits de fond sont envoyés vers le dépentaniseur commun à l'ensemble des trains. En fonctionnement normal le dépentaniseur n'est pas nécessaire, cela explique pourquoi il n'a été prévu qu'un seul pour les six trains.

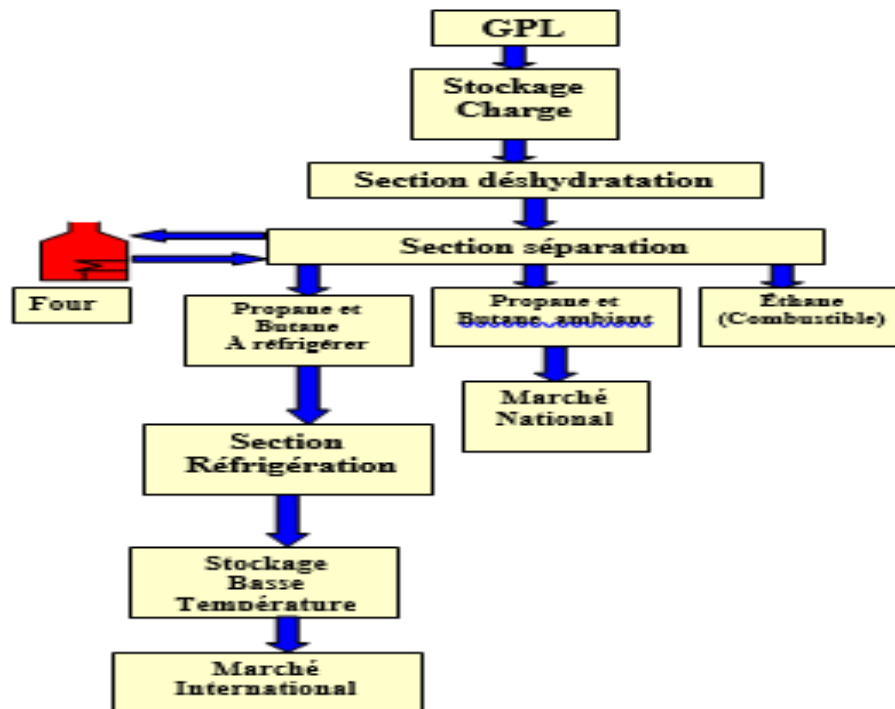


Figure I 5-Schéma synoptique du complexe GP1Z

### I.2.9.1 Description de la colonne de fractionnement 32-V-7101

Colonne cylindrique vertical constituée à partir des véroles (tole roulée et soudée) et une partie conique à laquelle sont rapportés par soudage, deux fonds elliptiques, des piquages, des brides, des instruments et le tout sur un support (jupe) et des organes internes tels que plateaux, l'équipement est totalement calorifugé.

Cette colonne est équipée de 55 plateaux à clapets. C'est dans cette colonne qu'on récupère en tête l'Éthane et le Propane et au fond le Butane et le Pentane.

---

## **Chapitre II**

### **Etude théorique**

---

## II.1 Introduction

Les réservoirs sous pression sont des structures destinées au traitement, au stockage ou à la réception de fluides, comme les colonnes. Les appareils à pression sont des récipients conçus pour contenir des fluides ou des gaz à différente pression, la pression intérieure est généralement plus élevée que la pression extérieure

Les réservoirs doivent aussi être pris en considération lorsqu'on évoque les appareils à pression.

Les réservoirs diffèrent des réservoirs sous pression par leur pression de fonctionnement. Les réservoirs fonctionnent à pression atmosphérique, tandis que les réservoirs sous pression sont conçus pour contenir des fluides sous pression. De plus, les réservoirs sous pression peuvent souvent avoir des parois internes pour renforcer leur structure, ce qui n'est pas courant dans la plupart des réservoirs ordinaires.

Plusieurs normes et réglementations régissent chaque partie des appareils à pression. Toutefois, le code des appareils à pression (BPVC) de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) est une norme largement acceptée.

Dans le cadre de ses responsabilités, le département conçoit, construit, installe, teste, inspecte et certifie les appareils à pression. La section VIII de l'ASME BPVC régit les appareils à pression.[6] [7]

## II.2 Classification des réservoirs sous pression

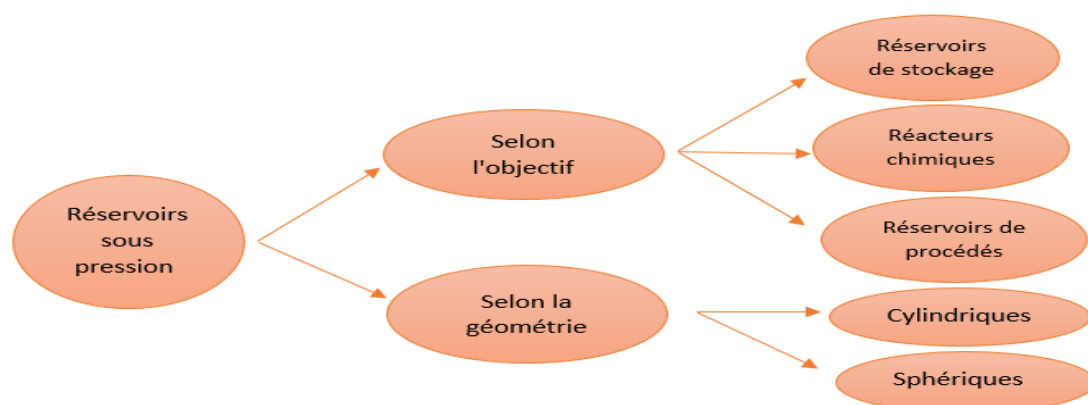


Figure II 1-classification des réservoirs sous pression



---

## **II.2.1: Selon la géométrie**

### **II.2.1.1 Cylindriques**

Les réservoirs cylindriques sont les plus courants. Ils sont polyvalents et moins coûteux à fabriquer que les réservoirs sphériques. Leur forme est similaire à celle d'un cylindre, avec des extrémités appelées têtes.

### **II.2.1.2 Sphériques**

Les réservoirs sphériques ont une conception robuste et sont idéaux pour stocker des fluides sous haute pression. Cependant, leur fabrication est plus complexe et coûteuse.

La structure solide d'un réservoir sphérique résulte de la répartition uniforme des contraintes internes sur sa surface, éliminant ainsi tout point de concentration de contraintes.

### **II.2.1.3 Coniques**

Les réservoirs coniques ont une forme conique et sont utilisés pour des applications spécifiques.

## **II.2.2 selon l'objectif**

### **II.2.2.1 Réservoirs de stockage**

Les réservoirs de stockage sont utilisés dans l'industrie pour contenir les liquides et les gaz dans des conditions extrêmes. EX : stockage de GNL dans des bacs de stockage sous une température de  $-162^{\circ}\text{C}$

### **II.2.2.2 Les réacteurs chimiques**

Les réacteurs chimiques sont des réservoirs fermés utilisés pour contenir les réactifs et les catalyseurs pendant une réaction chimique. Ils sont équipés d'agitateurs pour faciliter le contact moléculaire entre les réactifs.

### **II.2.2.3 Réservoirs de procédés**

Ils sont spécifiquement conçus pour des processus industriels particuliers, tels que La colonne de distillation, parfois appelée tour, est une structure cylindrique disposée verticalement, avec une hauteur bien plus importante que son diamètre. Ce composant est couramment utilisé dans les raffineries.[8]

---

Le terme "colonne" est fréquemment employé pour désigner ces équipements de distillation. Leur rôle principal est de fractionner les hydrocarbures contenus dans le pétrole brut, les séparant ainsi les uns des autres pour obtenir différentes fractions.

### II.3 Les composants d'un réservoir avec paroi mince sous pression

Généralement un réservoir sous pression se compose de 3 parties principaux qui sont :

1. Les fonds
2. La virole
3. Les tubulures



Figure II 2-les composants d'un réservoir sous pression

#### II.3.1 Les fonds

Les fonds sont les parties du réservoir qui scellent les extrémités. Ils jouent un rôle majeur dans le comportement des contraintes d'un réservoir sous pression, en tant que zone critique nécessitant une étude approfondie pour sélectionner le type de fond le plus adapté aux conditions de fonctionnement.

Il existe plusieurs types des fonds :

- Fonds plats
- Fonds hémisphériques
- Fonds ellipsoïdaux
- Fonds Tori-sphériques
- Fonds coniques

---

### II.3.1.1 Les types des fonds

- **Fonds plats**

Les têtes plates ou plaques sont les fermetures d'extrémité les plus basiques, réservées aux petites embarcations. Elles servent de couvercles pour les trous d'homme sur les réservoirs à basse pression ou pour de petites ouvertures.

- **Fonds hémisphériques**

La forme hémisphérique est utilisée pour créer des extrémités arrondies, assurant une répartition uniforme de la pression interne et contribuant à la stabilité globale. Leur forme arrondie permet de répartir efficacement les charges et de minimiser les contraintes.

La quantité de formage nécessaire pour produire une forme hémisphérique est plus importante, ce qui se traduit par un coût de formage plus élevé

- **Fonds ellipsoïdaux**

Les fonds ellipsoïdaux sont souvent utilisés pour des pressions supérieures à 10 bars. Ils adoptent une forme d'ellipse où le rayon varie de manière continue. Cela assure une transition fluide entre le dôme et la partie cylindrique du réservoir. Leur forme est caractérisée par le rapport entre le grand et le petit axe. Un choix standard pour les navires est le fond elliptique, qui, grâce à sa légère convexité, permet une réduction des coûts de formage

- **Fonds Tori-sphériques**

Une forme tori-sphérique, couramment utilisée comme fermeture d'extrémité pour divers appareils à pression cylindriques, est proche de celle d'une ellipse mais plus facile et moins coûteuse à fabriquer. Les fonds tori-sphériques sont constitués d'une coupelle à rayon constant. L'assemblage direct de cette coupelle à la section cylindrique du récipient provoque un changement rapide de géométrie, entraînant des contraintes locales excessives. Pour éviter cela, une section de transition (Knuckle) est ajoutée entre la coupelle et le cylindre. Ces configurations sont généralement utilisées pour des applications à très haute pression.

- **Fonds coniques**

Le fond conique est incliné vers le centre du réservoir.

Il est utilisé pour faciliter la vidange complète du réservoir, car les liquides s'écoulent naturellement vers le point le plus bas.[9]

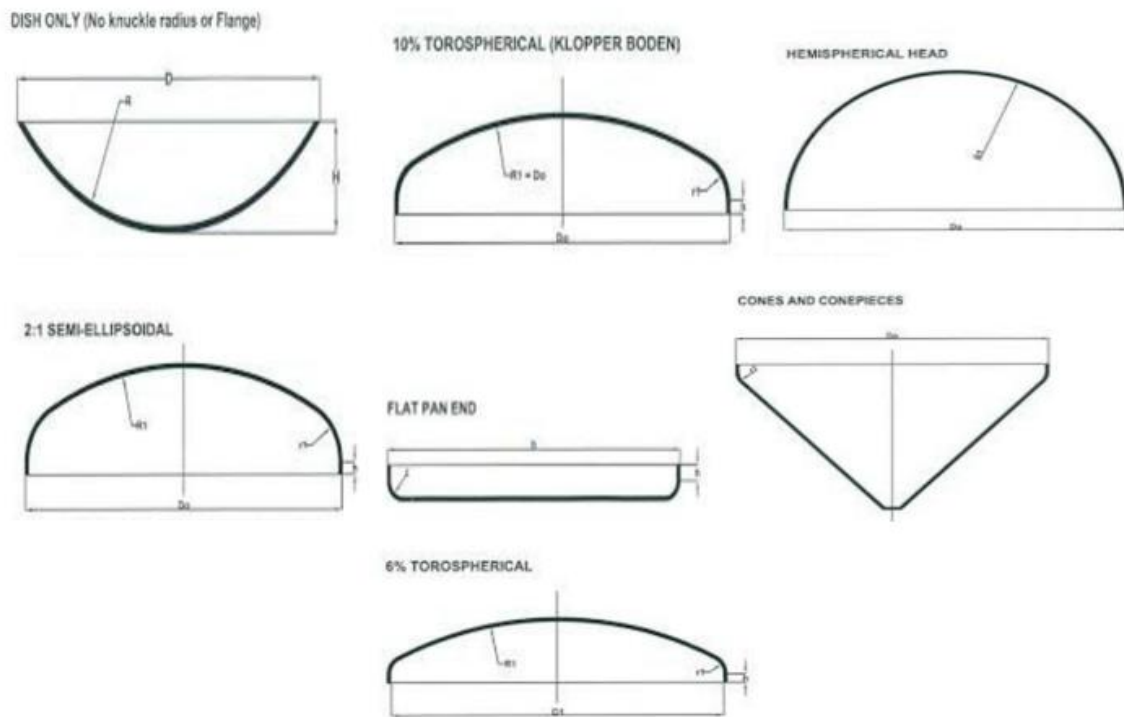


Figure II 3-Les différents types des fonds

### II.3.2 La virole

La virole est la partie cylindrique du réservoir qui relie les deux fonds. Elle constitue la majeure partie du corps du réservoir.

La virole est conçue pour résister à la pression interne du fluide contenu dans le réservoir. Elle doit être suffisamment robuste pour éviter toute déformation plastique ou rupture.

### II .3.3 Les tubulures

Les tubulures d'un réservoir sous pression sont essentielles pour son fonctionnement et sa sécurité. Ce sont des connexions ou des tuyaux par lesquels les fluides entrent ou sortent du réservoir. Généralement, elles se trouvent sur les côtés ou au sommet de celui-ci. Il est crucial que ces tubulures soient correctement dimensionnées pour éviter les fuites et les défaillances.

---

## II .4 La distillation

### II.4.1 Définition

Est un procédé de séparation de mélange de substances liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle permet de séparer les constituants d'un mélange homogène.

La distillation est l'un des procédés de séparation liquide-vapeur les plus courants dans l'industrie, et elle peut être réalisée de manière continue ou en batch. Elle fonctionne en appliquant et en retirant de la chaleur pour exploiter les différences de volatilité relative entre les composants d'un mélange

Elle permet de séparer efficacement les constituants d'un mélange en fonction de leurs points d'ébullition, ce qui est essentiel pour obtenir des produits finis de haute qualité.

Les installations de distillation sont souvent conçues pour maximiser la récupération de chaleur, réduisant ainsi la consommation d'énergie.

La distillation peut être ajustée pour traiter différents types de mélanges et pour produire une gamme variée de produits, répondant ainsi aux demandes du marché.

Elle offre un équilibre optimal entre l'efficacité de la séparation, la simplicité du processus, la récupération d'énergie, la flexibilité, et les coûts d'investissement et d'exploitation, ce qui en fait la méthode de choix pour la séparation dans l'industrie. [10]

### II.4.2 Le principe de la distillation

Voici les étapes clés du processus de la distillation :

- **Chauffage** : Le mélange est chauffé jusqu'à ce que le composant le plus volatil atteigne son point d'ébullition et commence à s'évaporer.
- **Vaporisation** : Les vapeurs du composant volatil montent à travers la colonne de distillation si elle est utilisée (dans le cas de la distillation fractionnée).
- **Condensation** : Les vapeurs sont ensuite refroidies dans un condenseur, où elles se transforment en liquide.
- **Collecte** : Le liquide condensé, appelé distillat, est collecté séparément. Ce distillat est plus riche en composant volatil que le mélange d'origine.

---

## II.4.3 Type de distillation

- **La distillation simple**

Une distillation simple est utilisée lorsque les composants du mélange liquide présentent des écarts de point d'ébullition proches de cinquante degrés. Cela implique d'abord de faire bouillir le mélange, et le composé ayant le point d'ébullition le plus bas commencera à se vaporiser. Considérons un mélange de deux liquides. La vapeur formée sera riche en composé ayant le point d'ébullition le plus bas. À ce stade, la température reste stable jusqu'à ce que la fraction du composé ayant le point d'ébullition le plus bas dans le mélange liquide atteigne zéro. Par la suite, la température recommence à augmenter jusqu'à atteindre le point d'ébullition du composé ayant le point d'ébullition le plus élevé.

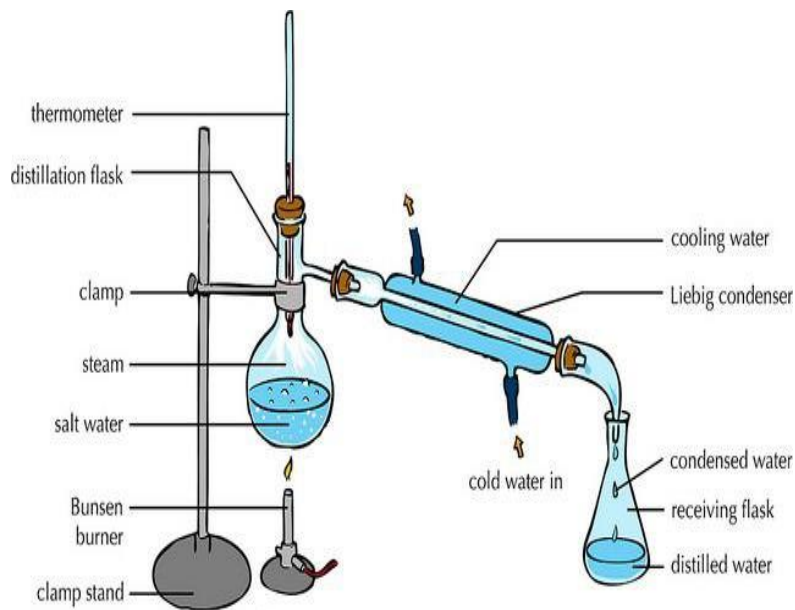


Figure II 4-Le principe de la distillation simple

- **La distillation fractionnée**

La distillation fractionnée est une technique utilisée pour de nombreux mélanges liquides complexes, c'est-à-dire des mélanges dont les composants ont des points d'ébullition plus proches. Pour de tels systèmes, une simple distillation n'aura aucun sens. Une distillation modifiée est donc nécessaire. Pour que la distillation fractionnée soit efficace, les composants doivent être miscibles.

---

L'appareil de cette méthode est quelque peu différent d'un simple appareil de distillation. Il y a une colonne de fractionnement fixée au ballon qui contient le mélange liquide. La colonne de fractionnement contient des billes de verre pour fournir une plus grande surface propice à la vaporisation et à la condensation. Par exemple, prenons un mélange liquide de deux composants. En chauffant le mélange, la vapeur formée sera composée des deux composants. À un moment donné, le sommet de la colonne de fractionnement atteindra la température du point d'ébullition inférieur, le composant qui a le point d'ébullition le plus bas sera distillé. La quantité totale du composant ayant le point d'ébullition le plus bas sera progressivement collectée dans le ballon, et celui avec le point d'ébullition le plus élevé restera dans le ballon.

La distillation fractionnée est la technique utilisée pour purifier le pétrole brut en de nombreux composants.[11]

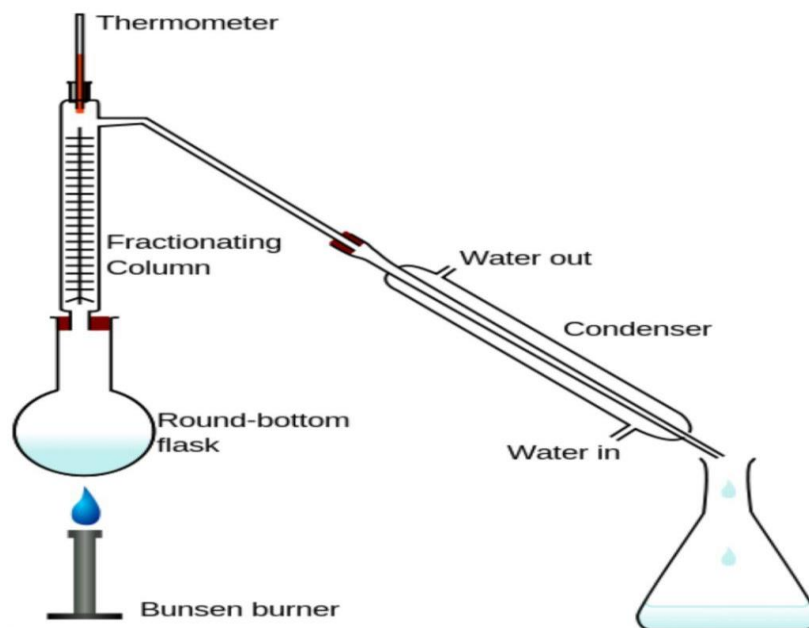


Figure II 5-le principe de la distillation fractionnée

#### II.4.4 La distillation du pétrole brut en vue d'obtenir les produits intermédiaires

La distillation du pétrole brut est réalisée en deux étapes complémentaires. Une première distillation, dite atmosphérique (réalisée à pression atmosphérique), permet de séparer les gaz, les essences et le naphtha (coupes légères), le kérosène et le gazole (coupes moyennes) et les coupes lourdes. Les résidus issus de la distillation atmosphérique subissent une deuxième distillation, dite sous vide (colonne dépressurisée), afin de récupérer des produits moyens supplémentaires ayant une valeur commerciale.

---

- **La distillation atmosphérique**

L'opération consiste à séparer les différents composants d'un mélange liquide en fonction de leur température d'évaporation. Le pétrole brut est injecté dans une grande tour de distillation, haute de 60 mètres et large de 8 mètres environ, où il est chauffé à environ 400°C. Les différents hydrocarbures contenus dans le pétrole brut sont vaporisés : d'abord les légers, puis les moyens, et enfin une partie des lourds. La température décroît au fur et à mesure que l'on monte dans la tour, permettant à chaque type d'hydrocarbure de se liquéfier afin d'être récupéré. Les plus légers sont récupérés tout en haut, et les plus lourds restent au fond de la tour.

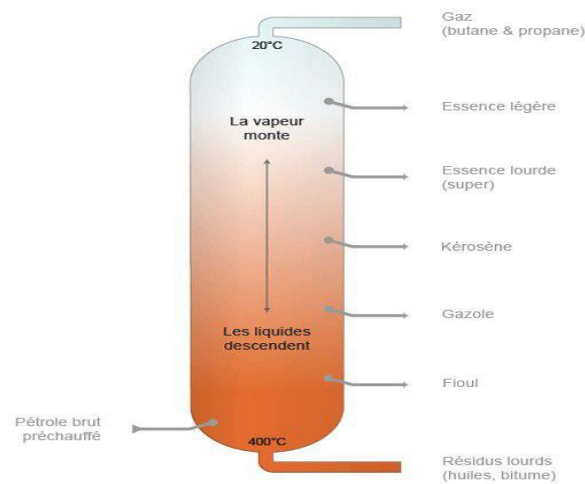


Figure II 6-l'opération de la distillation atmosphérique

- **La distillation sous vide**

L'opération consiste à séparer, sur le même principe que la distillation atmosphérique, les produits lourds des résidus de produits moyens en les soumettant à une deuxième phase de distillation dite « sous vide ». Une colonne plus petite est fermée puis dépressurisée. Cette chute de pression permet de récupérer plus facilement les produits lourds dont la température d'ébullition est abaissée. Du gazole est récupéré en haut de la colonne et du fioul lourd à sa base. Les résidus de cette distillation sous vide sont récupérés en vue de produire des lubrifiants.[12]



---

## II.4.5 La colonne de distillation

La colonne de distillation est une tour verticale équipée d'un certain nombre de plateaux horizontaux. Le liquide à distiller est introduit dans la partie supérieure de la colonne, appelée le pot de distillation. Le liquide est chauffé, ce qui provoque sa vaporisation. Les vapeurs sont ensuite entraînées vers le bas de la colonne, où elles rencontrent des plateaux contenant un liquide de refroidissement, qui peut être de l'eau ou un autre liquide approprié. Les vapeurs se condensent sur les plateaux et forment un liquide. Ce liquide, appelé le distillat, est retiré de la colonne par le bas.

Les composants avec les températures d'ébullition les plus basses se condensent en premier et sont récupérés en haut de la colonne. Les composants avec les températures d'ébullition les plus élevées se condensent en dernier et sont récupérés en bas de la colonne. En ajustant la température de la colonne et la pression à différents niveaux, il est possible d'obtenir une séparation efficace des composants d'un mélange.[13]

### II.4.5.1 Le type d'interne de la colonne

- **Colonne à plateaux**

Les plateaux forcent le liquide à circuler d'avant en arrière horizontalement tandis que la vapeur forme des bulles et passe à travers les trous dans les plateaux.

Les plateaux permettent d'augmenter la surface de contact entre les phases liquide et le gaz.

Il existe trois types de plateaux :

- **Plateaux à clapets** : meilleur rendement, évitent le pleurage.
- **Plateaux perforés** : légers et peu coûteux, mais leur rendement thermique est médiocre avec risque de perte de liquide (pleurage).
- **Plateaux à cloches** : ils réalisent de très bons rendements thermiques mais lourds. Leur construction est très coûteuse.

Dans le domaine des réalisations industrielles, les plateaux constituent les systèmes les plus couramment utilisés pour garantir l'échange entre la vapeur ascendante et le liquide rétrogradant.

- **Colonne à garnissage**

Le garnissage présent dans une colonne a pour objectif de mettre en contact la phase liquide, qui redescend par gravité, avec la phase vapeur qui monte vers la tête de colonne.

Le garnissage doit offrir une grande surface mouillée pour assurer une importante surface d'échange de matière entre le liquide et la vapeur.

---

### **II.4.5.2 Dimensions d'une colonne**

Les dimensions principales d'une colonne de distillation sont sa hauteur et son diamètre.

La hauteur de la colonne dépend de son efficacité et du nombre d'étages théoriques dont elle est capable. Plus d'étages permettent une meilleure séparation, mais augmentent également le coût d'investissement.

Le diamètre de la colonne est déterminé par les flux de gaz et de liquide. Il dépend de la production de la colonne et du nombre d'étages théoriques. Ce pouvoir de séparation est influencé par le nombre de plateaux réels ou la hauteur de garnissage.

Elle aussi est dépendante de :

- La composition du mélange et de la nature des constituants
- Leur point d'ébullition et de la teneur en vapeur

## **II.5 Analyse des contraintes agissant sur un réservoir sous pression**

La sécurité des récipients sous pression est primordiale en raison des risques élevés associés à leur utilisation et les différentes contraintes agissent sur la structure du réservoir. Les fuites ou ruptures de ces récipients peuvent entraîner des conséquences graves, telles que des empoisonnements, des suffocations, des incendies, et même des explosions.

Pour prévenir de tels événements, il est crucial de suivre des normes strictes lors de la conception, de l'installation, de l'exploitation et de l'entretien des appareils à pression. Le code des appareils à pression de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) est l'une des normes les plus reconnues à cet égard. Ce code fournit des directives détaillées pour la conception, la fabrication, les tests, l'inspection et la certification des appareils à pression pour garantir leur intégrité et leur sécurité d'utilisation.

Les méthodes analytiques et expérimentales jouent un rôle essentiel dans la détermination des contraintes de fonctionnement des récipients sous pression. Ces méthodes permettent d'évaluer la résistance des matériaux, la stabilité structurelle et la durabilité des récipients face aux pressions internes et externes qu'ils subissent au cours de leur utilisation.

### **II .5.1 Analyse des contraintes dans les appareils sous pression selon le code ASME**

L'ASME a élaboré le code des chaudières et des appareils à pression (BPVC), qui est largement accepté à l'échelle internationale. Ce code fournit des exigences pour la certification des fabricants et l'assurance qualité des appareils sous pression

---

Il couvre la conception, les matériaux, la fabrication, l'inspection, les tests et l'exploitation des chaudières, des réservoirs et d'autres appareils sous pression.

La section VIII du BPVC régit spécifiquement les appareils à pression. Elle se divise en trois parties :

- **Division I** : Conception des récipients sous pression pour des pressions internes ou externes dépassant 15 psi. Approche de conception par règle basée sur la théorie des contraintes normales.
- **Division II** : Couvre les récipients sous pression pour des pressions allant jusqu'à 10 000 livres par pouce carré. Exigences plus strictes pour les matériaux et la conception. Approche de conception par analyse basée sur la théorie de l'énergie de distorsion maximale.
- **Division III** : Identifie les récipients sous pression pour des utilisations supérieures à 10 000 livres par pouce carré.

L'ASME fournit des directives pour calculer ces les contraintes maximales admissibles pour les contraintes circulaires et longitudinales de la membrane et s'assurer que les matériaux et la conception des appareils peuvent les supporter sans défaillance.

La relation entre les contraintes de membrane (qui résultent de la pression interne du fluide) et les contraintes de flexion (qui résultent de la déformation du matériau) est essentielle. Les normes définissent des critères pour équilibrer ces contraintes, évitant ainsi une défaillance prématurée du réservoir.

La forme, la taille et la rigidité du réservoir sont également prises en compte

Les contraintes de fatigue sont des contraintes répétitives qui peuvent entraîner la formation et la propagation de fissures dans un matériau.

Elles sont particulièrement préoccupantes dans les zones soumises à des cycles de charge variables, comme les fluctuations de pression ou les changements de température

Les procédures de soudage doivent être qualifiées pour prouver qu'elles peuvent produire des soudures avec les propriétés mécaniques et chimiques requises

Le code ASME définit des règles pour garantir des soudures de qualité dans les réservoirs sous pression. Il exige des procédures de soudage approuvées, des inspections rigoureuses et la réduction des contraintes résiduelles. Ces normes visent à assurer la solidité des soudures, leur intégrité et la sécurité des équipements.

---

## II.5.2 stress membranaire

Dans un récipient sous pression, la "membrane" désigne la paroi mince du récipient conçue pour résister aux forces de tension dues à la pression interne. Lorsque l'épaisseur de cette paroi est relativement faible par rapport aux autres dimensions du récipient ( $R/t > 10$ ), les récipients sont considérés comme des membranes, et les contraintes résultantes de la pression interne sont faibles. Les contraintes membranaires sont des contraintes moyennes de tension ou de compression uniformément réparties sur la paroi du réservoir et agissant tangentiellement à sa surface. La membrane ou la paroi est supposée ne pas offrir de résistance à la flexion. Cependant, lorsque la paroi résiste à la flexion, les contraintes de flexion s'ajoutent aux contraintes membranaires. Le "stress membranaire" dans un récipient sous pression est la contrainte uniformément répartie à travers l'épaisseur de la membrane, principalement due à la pression interne et agissant dans le plan de la membrane, sans causer de flexion significative.

Dans les récipients sous pression de forme complexe, la situation des contraintes est bien plus nuancée que ce que les simples calculs de contraintes membranaires peuvent révéler. Les contraintes membranaires, qui sont des contraintes moyennes de tension ou de compression supposées uniformes sur la paroi, ne tiennent pas compte de nombreux facteurs qui affectent la distribution réelle des contraintes dans le récipient.

Les types de fonds (plats, hémisphériques, ellipsoïdaux, etc.) influencent la manière dont les contraintes sont réparties en raison de leur géométrie spécifique. Par exemple, un fond hémisphérique permet une répartition plus uniforme des contraintes par rapport à un fond plat.

Les supports et les fixations externes introduisent des contraintes locales qui peuvent causer des concentrations de contraintes, nécessitant une analyse plus détaillée pour éviter les défaillances.

Les variations d'épaisseur et de section dans la paroi du récipient entraînent également des variations dans la distribution des contraintes, car les zones plus épaisses peuvent attirer plus de contraintes en raison de leur rigidité accrue.

Les buses et autres ouvertures créent des discontinuités qui perturbent la distribution uniforme des contraintes membranaires et peuvent devenir des points de faiblesse si elles ne sont pas correctement renforcées.

Enfin, la flexion générale due au poids du récipient, aux forces externes comme le vent et à l'activité sismique, ajoute une complexité supplémentaire. Ces forces peuvent induire des contraintes de flexion qui s'ajoutent aux contraintes membranaires et modifient la distribution des contraintes dans le récipient.

---

### II.5.3 Différentes contraintes dans la paroi

En plus du stress membranaire, il existe d'autres types de contraintes dans la paroi d'un récipient sous pression :

**Contrainte circonférentielle (ou de hoop)  $\sigma_h$**  : Elle agit autour de la circonférence du récipient et est souvent la plus grande contrainte dans un récipient sous pression cylindrique

**Contrainte longitudinale  $\sigma_L$**  : Elle agit le long de l'axe du récipient et est généralement plus petite que la contrainte circonférentielle dans un récipient cylindrique.

**Contrainte radiale  $\sigma_r$**  : Elle agit perpendiculairement à la paroi du récipient et est généralement négligée dans l'analyse des récipients à paroi mince.[14]

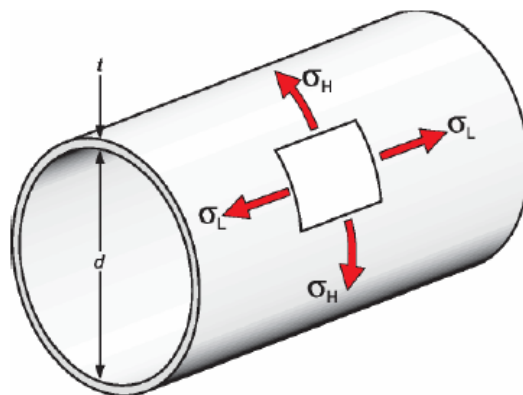


Figure II 7-Les différentes contraintes appliquées sur la paroi de l'équipement

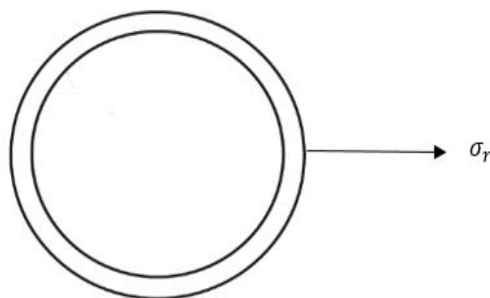


Figure II 8-la contrainte radiale

---

## II.6 Présentation des logiciels de simulation

### II.6.1 Le logiciel ANSYS

ANSYS est une suite logicielle de simulation qui couvre divers domaines tels que la mécanique des structures, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme et bien plus encore.

ANSYS offre des fonctionnalités puissantes pour aborder des problèmes complexes grâce à des méthodes de calcul et de modélisation numérique avancées.

Il est largement utilisé dans l'industrie pour prédire le comportement des produits, optimiser les conceptions et garantir leur sécurité.

Le logiciel ANSYS [4,5] a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège à Houston, PA, USA. Il s'agit d'un outil de développement en analyse d'ingénierie. La méthode utilisée est celle des éléments finis. Il est utilisé dans des domaines allant de l'automobile et l'électronique à l'aérospatiale et la chimie. Le logiciel ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composantes ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de température ou l'effet de champs électromagnétiques.

#### II.6.1.1 Applications

ANSYS est utilisé dans une grande variété d'applications et des secteurs :

- **Simulation Mécanique (ANSYS Mechanical) :** Analyse statique, modale, thermique, non linéaire.

ANSYS est un outil de simulation largement utilisé dans l'ingénierie des systèmes mécaniques. Il permet d'évaluer la durée de vie des matériaux, d'analyser les contraintes, les déformations et les vibrations, et d'optimiser la conception des produits. Grâce à ANSYS, les ingénieurs peuvent modéliser et étudier des phénomènes complexes, garantissant ainsi la sécurité et la performance des structures et des machines

- **Dynamique des Fluides (ANSYS CFX, Fluent) :** Modélisation des écoulements, transferts thermiques, etc.

---

Les outils de simulation d'ANSYS en dynamique des fluides permettent l'analyse détaillée de divers phénomènes comme l'écoulement des fluides, la combustion et la convection thermique. Leur utilisation s'étend à la conception de systèmes tels que les systèmes de refroidissement, les conduites d'eau, les structures aéronautiques et les moteurs, offrant ainsi des avantages significatifs en termes d'efficacité et de performance pour les ingénieurs.

- **Électromagnétisme (ANSYS HFSS) :** Simulation des champs électromagnétiques.

La simulation des champs électromagnétiques est cruciale pour la conception et l'optimisation de dispositifs électroniques. Les logiciels Ansys, comme Maxwell pour les fréquences basses et HFSS pour les hautes fréquences, permettent aux ingénieurs de modéliser et d'analyser ces champs avec précision. Ces outils réduisent le temps de développement et améliorent la performance des produits, en éliminant souvent le besoin de prototypes physiques. Si vous avez besoin d'aide avec ces logiciels ou pour des problèmes spécifiques de simulation, je suis à votre disposition pour vous assister.

- **Multiphysique :** Couplage de plusieurs domaines physiques (mécanique, thermique, électromagnétisme, etc.).

### II.6.1.2 Ansys WorkBench

Cette plateforme présente une approche novatrice en utilisant le code ANSYS existant pour la construction de modèles. Elle est spécialement conçue pour gérer des cas avec une géométrie complexe, impliquant de nombreux corps de pièces, et elle convient également aux utilisateurs novices dans le domaine de la simulation. Dans cet environnement, l'utilisateur se concentre principalement sur la géométrie plutôt que sur le modèle lui-même. La plateforme se charge de traduire les instructions de l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Bien que le modèle d'éléments finis généré soit compatible avec ANSYS, il reste possible d'ajouter des commandes spécifiques à ANSYS pour le manipuler.

- **Intégration des données :** Elle permet d'intégrer les données à travers les simulations d'ingénierie pour créer des modèles plus précis de manière plus efficace.
- **Gestion des données :** Vous pouvez facilement gérer les données à travers tous vos produits Ansys et gagner du temps avec le transfert automatique des données.
- **Analyses multiples :** Intégrez plusieurs analyses au sein d'une même interface pour créer des modèles de plus haute-fidélité.[15]

---

### II.6.1.3 ANSYS « Static Structural »

L'outil "Static Structural" d'Ansys est utilisé pour effectuer des analyses structurelles statiques en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) il est utilisé pour effectuer des analyses de structures statiques linéaires et non linéaires

#### I.6.1.4 Utilisations d'ANSYS « Static Structural »

- **Modélisation FEM** : Créez un modèle géométrique de la structure à analyser. Définissez le maillage qui divise la structure en éléments finis.
- **Conditions aux limites** : Appliquez les conditions aux limites appropriées. Cela peut inclure des supports fixes, des charges appliquées, et d'autres types de conditions qui simulent l'environnement de la structure
- **Non-linéarité** : Tenez compte des non-linéarités matérielles, géométriques ou de contact si elles sont présentes. Les non-linéarités peuvent affecter significativement les résultats et doivent être modélisées avec précision
- **Pré-traitement** : Avant de lancer l'analyse, assurez-vous que toutes les propriétés matérielles, les conditions aux limites et les charges sont correctement définies.
- **Post-traitement** : Utilisez les outils de post-traitement pour visualiser et interpréter les résultats. Cela peut inclure l'affichage des contours de contrainte, des déformations, et l'extraction de données pour une analyse plus approfondie.

Il est important de noter que les analyses structurelles statiques sont basées sur l'hypothèse que les charges sont appliquées lentement et que la structure est en équilibre. Pour les problèmes où les charges sont appliquées rapidement

### II.6.2 Logiciel SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur, appartenant à la société Dassault Systèmes. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers qui sont liés : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres.

SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D, ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et se veut intuitif.[16]

Le logiciel SolidWorks permet de :

Concevoir des objets en 3D de manière très précise.



- 
- Développer des produits
  - Vérifier la conception de votre fichier
  - Détenir une bibliothèque de vos fichiers 3D
  - Mettre en place des mises en plan 2D
  - Créer des images et animations de vos objets 3D
  - Estimer le coût de la fabrication de vos objets 3D

### II.6.2.1 Les fonctionnalités du logiciel SolidWorks

- **Esquisse 2D** : Permet de créer des esquisses qui servent de base pour les modèles 3D.
- **Modélisation 3D** : Transforme les esquisses 2D en modèles 3D à l'aide de fonctions telles que l'extrusion, la révolution, le balayage et le lissage.
- **Assemblages** : Permet de combiner plusieurs pièces en un seul assemblage pour simuler le fonctionnement d'un produit complet.
- **Mises en plan** : Crée des dessins techniques à partir des modèles 3D pour la fabrication.
- **Simulation** : Évalue la performance des pièces et assemblages sous diverses contraintes physiques.
- **Gestion des données** : Aide à organiser et gérer les données de conception tout au long du cycle de vie du produit.
- **Rendu** : Produit des images réalistes des modèles 3D pour la visualisation et la présentation.
- **Dessin technique** : SolidWorks automatise la création de mises en plan techniques à partir des modèles 3D, facilitant ainsi la production de dossiers de fabrication précis. Les fonctionnalités incluent la construction de vues en coupe, l'ajout de dimensions, de notes et de nomenclatures, assurant ainsi la clarté et la précision nécessaires pour la fabrication des pièces.

---

## II.6.2.2 Modélisation 3D par SolidWorks

La modélisation 3D dans SolidWorks est un processus essentiel pour la conception mécanique, offrant une variété d'outils pour créer des pièces et des assemblages précis. On peut trouver les fonctionnalités de modélisations 3D suivants :

- **Création des pièces :** SolidWorks permet de créer des pièces solides ou des surfaces à partir d'esquisses 2D. Les outils de modélisation incluent l'extrusion, la révolution, le balayage, et bien d'autres.
- **Modélisation de surface :** Pour les formes qui ne peuvent pas être créées comme des solides, SolidWorks propose des outils de modélisation de surface avancés, permettant de concevoir des géométries complexes avec précision.
- **Fonctionnalités avancées :** SolidWorks offre des fonctionnalités avancées telles que la simulation, l'analyse de mouvement, et la validation de conception pour tester les performances des pièces et assemblages sous diverses conditions.
- **Bibliothèque des pièces standards Préconçue :** Une bibliothèque complète de pièces standard est disponible pour accélérer le processus de conception et assurer la conformité aux normes industrielles. Les utilisateurs peuvent sauvegarder des conceptions de pièces ou d'assemblages pour les réutiliser dans de nouveaux projets, ce qui économise du temps et assure la cohérence.
- **Modification du modèle :** SolidWorks offre une flexibilité pour modifier les modèles grâce à la modélisation paramétrique, où les modifications d'une partie peuvent se répercuter sur l'ensemble du modèle.
- **Interopérabilité :** SolidWorks facilite l'échange de données avec d'autres logiciels CAO grâce à son interopérabilité, permettant ainsi une collaboration efficace entre différentes plateformes de conception.

Ces fonctionnalités font de SolidWorks un outil puissant pour la modélisation 3D, offrant aux ingénieurs et concepteurs la capacité de créer, tester, et modifier des conceptions de manière rapide et précise.

## II.7 Méthode numérique « méthode des éléments finis »

### II.7.1 Définition de la méthode des éléments finis

La méthode de simulation par éléments finis (MEF) choisie par ANSYS Workbench est une approche puissante pour modéliser et résoudre des problèmes complexes dans divers domaines de l'ingénierie tels que la mécanique des solides,

Elle permet de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique

---

consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique : méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes.

## II.7.2 Principe de la Méthode des éléments finis (MEF)

La MEF est basée sur ces étapes :

- On subdivise une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds.
- On considère le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis on assemble ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.
- La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.
- Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

## II.7.3 Étapes logiques du calcul par éléments finis

- Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire  $[k_e]$  reliant les degrés de liberté (déplacements) nodaux  $\{u_e\}$  et les forces  $\{f_e\}$  appliquées aux nœuds :  
 $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global  $[K] \{U\} = \{F\}$  de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
- Résoudre le système  $[K] \{U\} = \{F\}$  et obtenir les déplacements  $\{U\}$  aux nœuds.
- Calculer les gradients dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

---

## II.7.4 Analyse par éléments finis

L'analyse par éléments finis consiste en une représentation mathématique d'un système physique, incluant une pièce ou un assemblage (modèle), les propriétés des matériaux et les conditions aux limites applicables, ce qu'on appelle communément le prétraitement. Ensuite, cette représentation mathématique est résolue (solution) et les résultats de cette solution sont étudiés (posttraitement). Bien que les formes et problèmes simples puissent souvent être résolus manuellement, la complexité des pièces et des assemblages réels nécessite généralement l'utilisation d'ordinateurs et de logiciels d'analyse spécialisés pour obtenir des résultats précis et rapides.

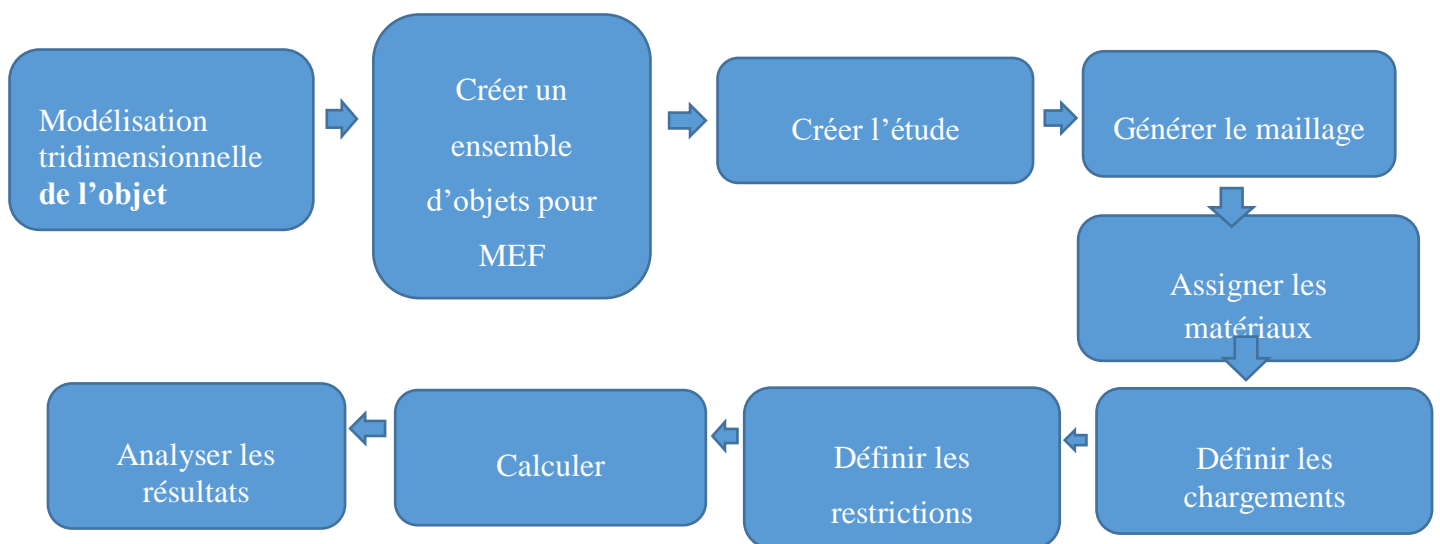


Figure II 9-Les étapes de l'analyse par éléments finis

### II.7.4.1 Prétraitement

Le modèle physique est converti en un modèle numérique grâce à la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et au processus de maillage. Ce maillage transforme le modèle en un ensemble d'éléments finis qui peuvent être analysés mathématiquement.

La qualité du maillage est déterminante pour la précision des résultats. Un maillage de haute qualité permet d'obtenir une représentation plus fidèle du modèle physique, ce qui conduit à des prédictions plus précises du comportement du modèle sous différentes charges et contraintes.

Les noeuds sont les points où les éléments finis se connectent, et ils jouent un rôle essentiel dans la définition de la géométrie du maillage. Les équations mathématiques qui relient ces noeuds sont basées sur la rigidité et d'autres propriétés physiques des matériaux.

---

Et pour un système de plusieurs éléments, les équations de chaque élément sont assemblées pour former un système d'équations globales qui peuvent être résolues pour prédire le comportement du modèle entier. C'est cette combinaison des comportements individuels des éléments qui permet de simuler des structures complexes qui ne peuvent pas être résolues par des méthodes analytiques simples.

#### **II.7.4.2 Différent type d'élément utilisé par le logiciel ANSYS**

Les programmes modernes d'analyse par éléments finis mécaniques à usage général utilisent généralement un ensemble d'éléments choisis pour leur polyvalence, leur robustesse et leur contribution globale à la facilité d'utilisation du produit.

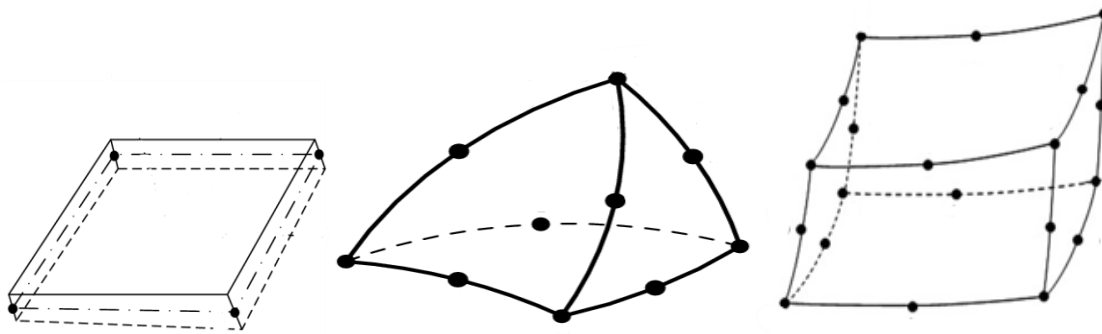
L'élément SOLID 187 est un élément tétraédrique d'ordre supérieur avec 10 noeuds quadratiques. Il est idéal pour les géométries complexes qui ne sont pas balayables, permettant une modélisation précise des formes irrégulières.

L'élément SOLID 186 est un élément hexaédrique, également connu sous le nom de brique, d'ordre supérieur avec 20 noeuds. Il est utilisé pour les géométries qui peuvent être balayées, ce qui offre une précision accrue dans la modélisation.

L'élément SHELL 181 est un élément de coque quadri-dominé avec 4 noeuds. Il est utilisé pour les modèles à surface fermée et combine précision et efficacité, étant particulièrement adapté aux structures minces.

Les éléments CONTACT 170/174 sont des éléments de contact surface à surface conçus pour simuler l'interaction entre différentes parties d'un assemblage, comme le frottement et la pression.

Enfin, l'élément BEAM 188 est un élément de poutre utilisé pour les modèles mixtes poutre/coque et pour les caractéristiques de soudage par points, permettant de simuler le comportement des structures linéaires.



**Noded shell**

**Noded tetrahedral**

**Noded hexahedral**

Figure II 10-Les types des éléments utilisés par le logiciel ANSYS

### II.7.4.3 Post traitement

Post traitement transforme les données brutes en informations visuelles compréhensibles qui permettent d'analyser et de comprendre le comportement du modèle étudié. Les graphiques générés peuvent révéler des zones de faiblesse structurelle, des surdimensionnements, ou des caractéristiques de performance critiques telles que la distribution thermique ou les fréquences propres.

L'interprétation des graphiques et des données post-traitées nécessite une expertise en ingénierie pour identifier les problèmes potentiels et valider la conception. C'est un processus qui combine la technologie et l'intuition pour assurer que le modèle numérique correspond bien à la réalité physique et répond aux exigences de conception.

La phase de post-traitement de l'analyse par éléments finis revêt une importance critique, où l'utilisateur examine attentivement les résultats obtenus, tels que les données numériques, les représentations graphiques colorées et les animations des mouvements. Cette étape requiert une comparaison minutieuse entre les résultats obtenus et les attentes initiales. Il est primordial de souligner que la responsabilité incombe à l'utilisateur de juger de la cohérence des résultats et d'expliquer ces derniers en se basant sur le sens commun de l'ingénierie. En cas de disparités entre les résultats attendus et obtenus, il est impératif de poursuivre les investigations jusqu'à ce qu'une explication satisfaisante soit trouvée, afin de pouvoir accorder pleinement sa confiance aux conclusions tirées.

L'utilisateur peut visualiser et interroger un ensemble de résultats sélectionnés. Les résultats sont les suivants : contraintes fondamentales, déformation, déformation, thermique, optimisation de la forme et fatigue. L'interrogation comporte plusieurs options :

- 
- **Scoping** : Permet de se concentrer sur des parties spécifiques d'un assemblage ou sur des faces individuelles d'une pièce pour examiner les résultats uniquement dans ces zones sélectionnées.
  - **Slicing** : Offre la possibilité de créer des plans de coupe à travers le modèle pour observer les résultats internes. Cela peut être fait en pivotant le modèle pour mieux visualiser la coupe, et il est possible d'avoir plusieurs coupes simultanément ou de déplacer une coupe à travers le modèle.
  - **Probe** : Fournit une méthode pour afficher les résultats de manière dynamique au survol avec le curseur, avec la possibilité d'afficher des étiquettes de sonde qui donnent des informations détaillées sur les points spécifiques.[17]

## **Chapitre III**

### **Calcul de vérification de stabilité de la colonne**



## III.1 Introduction

Les récipients sous pression peuvent être fabriqués à partir de matériaux fragiles, comme la fonte, ou de matériaux ductiles, comme l'acier doux. Ces récipients, qu'ils soient cylindriques ou sphériques, sont couramment utilisés dans l'industrie pour le transport de liquides et de gaz sous pression. Lorsqu'un appareil sous pression est exposé à une pression, le matériau qui le compose subit des contraintes provenant de toutes les directions.

Les réservoirs sous pression servent à stocker des fluides sous pression. Ces fluides peuvent changer d'état à l'intérieur du réservoir, comme c'est le cas pour les chaudières à vapeur, ou se combiner avec d'autres réactifs, comme dans une usine chimique. La conception de ces réservoirs est réalisée avec une grande précaution, car leur rupture peut provoquer des explosions, entraînant des conséquences graves sur les plans humains et matériel.

En résumé, la résistance d'un réservoir sous pression dépend de plusieurs paramètres : la forme des fonds, l'épaisseur des différentes parties, la pression maximale admissible, la température de conception, la résistance aux poussées de vent et la résistance à l'essai hydrostatique.

## III.2 Définitions

### III.2.1 Les contraintes agissant sur la colonne

Dans tout appareil à pression soumis à une pression interne ou externe, des contraintes s'installent dans la paroi de l'enveloppe. L'état de contrainte est triaxial et les trois contraintes principales sont :

$\sigma_L$  : Contrainte longitudinale

$$\sigma_L = \frac{PD}{4t}$$

$\sigma_h$  : Contrainte circonférentielle (membranaire)

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

La contrainte circonférentielle est la plus grande contrainte parmi ces contraintes alors on va négliger les autres contraintes dans les calculs

### **III.2.2 La pression maximale admissible**

La pression utilisée pour concevoir un récipient est appelée pression de calcul. Il est recommandé de concevoir un récipient et ses composants pour une pression supérieure à la pression de service. Une pression de calcul supérieure de 10 % à la pression de service, ou la plus élevée des deux, sera retenue pour satisfaire cette exigence. La pression du fluide sera également prise en compte.

La pression de service maximale admissible (MAWP) d'un réservoir est la pression autorisée au sommet du réservoir lorsqu'il est utilisé normalement à une certaine température. Cela signifie que le réservoir ne doit pas être soumis à une pression supérieure à celle spécifiée lorsque tout fonctionne comme prévu.

Cette pression est déterminée par des calculs pour chaque élément du réservoir sous pression en utilisant des épaisseurs nominales, sans tenir compte de la corrosion. Elle sert de référence pour établir les pressions de consigne de tous les dispositifs de décompression protégeant le récipient.

### **III.2.3 La température de design**

La température de calcul est la température que le métal de l'équipement atteindra lorsqu'il est utilisé sous certaines conditions. Elle dépend de l'utilisation de l'équipement et de la pression qu'il subit. Certains équipements possèdent une température de calcul maximale (MDMT), qui indique la limite à ne pas dépasser. Il existe aussi une température de calcul minimale, définissant la température la plus basse à laquelle les différentes parties de l'équipement peuvent être exposées en toute sécurité. En résumé, la température de calcul est un paramètre essentiel à considérer lors de la conception d'un équipement pour assurer son bon fonctionnement et sa sécurité.

### **III.2.4 L'épaisseur minimale requise**

L'épaisseur minimale requise désigne la plus petite épaisseur acceptable pour un matériau ou une structure spécifique, garantissant son intégrité, sa résistance et sa fonctionnalité. Cette épaisseur est généralement déterminée par des normes d'ingénierie, des codes ou des spécifications qui varient en fonction de l'application et des matériaux concernés.

Plusieurs facteurs influencent l'épaisseur minimale requise, notamment les propriétés du matériau, l'utilisation prévue, les charges ou contraintes attendues et les considérations de sécurité. L'objectif est de prévenir les défaillances structurelles, les déformations ou d'autres conséquences indésirables pouvant survenir si l'épaisseur tombe en dessous de la limite prescrite.

L'épaisseur requise doit être basée sur des considérations mécaniques et structurelles, en utilisant les formules de conception appropriées et les contraintes admissibles selon le code ASME. Pour les services présentant des conséquences potentielles élevées en cas de défaillance, l'ingénieur doit envisager d'augmenter l'épaisseur au-delà de l'épaisseur minimale calculée.

### III.3 L'essai hydrostatique

Lors d'un test hydrostatique à haute pression, le composant est rempli d'un fluide non compressible, généralement de l'eau, et soumis à une pression prédéterminée. La pression est maintenue pendant une période spécifiée pour vérifier l'absence de fuites, de déformations ou de défaillances de la structure. Ce test permet d'identifier les points faibles potentiels, tels que des fissures, des fuites ou des soudures défectueuses, qui pourraient compromettre la sécurité du composant en conditions normales de fonctionnement.

Les tests hydrostatiques sont essentiels pour garantir l'intégrité structurelle et la sécurité des récipients sous pression, des pipelines et d'autres composants critiques. Il permet d'identifier les faiblesses potentielles et garantit qu'elles répondent aux normes et réglementations requises. En soumettant le composant à des pressions dépassant ses conditions de fonctionnement prévues, ce processus de test fournit des informations précieuses pour éviter les pannes catastrophiques et garantir la fiabilité du système.

## III.4 La colonne de fractionnement 32-V-7101 complexe GP1Z

### III.4.1 Dimensionnement et conditions de fonction de colonne de fractionnement 32-V-7101

Les conditions de design	
Pression de design	2.35 MPa
Température de design	135 °C
Pression d'épreuve hydrostatique	3.53 Mpa
Surépaisseur de corrosion	3 mm
Epaisseur d'isolation	75 mm
La hauteur du colonne	49480 mm

Tableau III 1-Dimensions et conditions de fonctionnement de la colonne

---

**Les conditions fonctionnement**

---

<b>Fluide</b>	<b>GPL ( C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub> )</b>
<b>Pression de service</b>	<b>1.98 MPa</b>
<b>Température d'entrée</b>	<b>71 °C</b>
<b>Température de sortie</b>	<b>TOP 57 / BTM 111 °C</b>
<b>Nombre de plateau</b>	<b>55</b>
<b>Type de plateau</b>	<b>à clapet</b>

---

---

---

**Les rayons**

---

<b>La virole + le fond supérieur</b>	<b>2050 mm</b>
<b>La virole + le fond inférieur</b>	<b>2750 mm</b>

---

---

---

**Les épaisseurs**

---

<b>Le fond supérieur</b>	<b>43 mm</b>
<b>Le fond inférieur</b>	<b>56 mm</b>
<b>La virole supérieure</b>	<b>43 mm</b>
<b>La virole conique</b>	<b>62 mm</b>
<b>La virole inférieure</b>	<b>56 mm</b>

---

---



---

### Les constants selon le code ASME

---

<b>« E » L'efficacité des joints</b>	<b>1</b>
<b>« S » la contrainte admissible <math>\sigma_a</math></b>	<b>173.33 MPa</b>

---

### Le poids d'appareil

---

<b>Vide</b>	<b>383000 kg</b>
<b>Pleine d'eau</b>	<b>1251000 kg</b>

---

## III.5 Calcul des contraintes

Les propriétés du matériau sont les suivants :

Tableau III 2-Les propriétés du matériau SA-516M Gr485

Caractéristiques	Valeur
<b>Le matériau</b>	<b>SA-516M Gr485 (II. D metric p.86 ; ln.25)</b>
<b>La Densité :</b>	<b>7800 Kg /m<sup>3</sup></b>
<b>Module de Young</b>	<b>200 GPa</b>
<b>Coefficient de poisson :</b>	<b>0.29</b>
<b>La limite élastique :</b>	<b>260 MPa</b>

La contrainte maximale admissible du matériau du matériau SA-516M Gr485 peut être calculé d'après la limite élastique et le facteur de sécurité comme suite :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e^{tc}}{n}$$

### III.5.1 La contrainte admissible

$$\sigma_a = \frac{260}{1.5} = 173.33 \text{ MPa}$$

Selon le code ASME, Section VIII, Division 1 et Division 2, les contraintes primaires qui dépassent la limite d'élasticité du matériau peuvent entraîner une défaillance ou une déformation significative. Parmi ces contraintes primaires figure la contrainte membranaire due à la pression intérieure. Cette contrainte s'exerce sur toute la section transversale de la paroi, sauf à proximité des discontinuités telles que les intersections fonds-virole, les jonctions conique-virole, les buses et les supports.

### III.5.2 Calcul des contraintes membranaires

#### III.5.2.1 Le fond supérieur

Pour calculer la contrainte membranaire, en utilisant la relation suivante :

$$\sigma_h = \frac{P_c R^2}{2th}$$

$$\sigma_h = 106,6 \text{ MPa}$$

#### III.5.2.2 Le fond inférieur

Pour calculer la contrainte membranaire, en utilisant la même relation du fond supérieur :

$$\sigma_h = \frac{P_c R^2}{2th}$$

$$\sigma_h = 115,15 \text{ MPa}$$

#### III.5.2.3 La virole

La virole est divisée en 3 parties selon : la forme, le diamètre et l'épaisseur

##### III.5.2.3.1 La virole supérieure :

Pour calculer la contrainte membranaire, on peut utiliser la relation suivante :

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

$$\sigma_h = 112,03488 \text{ MPa}$$

### III.5.2.3.2 La partie conique

Dans cette partie, on va calculer la contrainte membranaire dans la section où se situe l'alimentation.

Pour calculer la contrainte membranaire on peut considérer la formule suivante :

$$\sigma_h = \frac{P(R_1 + R_2)}{2t}$$

$$\sigma_h = 90,96 \text{ MPa}$$

### III.5.2.3.3 la virole inférieure

Pour calculer la contrainte membranaire en utilisant la relation suivante :

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

$$\sigma_h = 115,40 \text{ MPa}$$

## III.6 Calcul de l'épaisseur minimale requis

### III.6.1 La virole

#### III.6.1.1 la virole supérieure

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer l'épaisseur minimale requis selon UG 27 [15 (pages 20-21)] :

$$t = \frac{P_c R}{SE - 0,6P_c}$$

$$t = 35,27 \text{ mm}$$

$t < t_c$  Alors l'épaisseur minimale de la virole supérieure est acceptable selon le code ASME

#### III.6.1.2 la virole conique

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer l'épaisseur minimale requis selon UG 32 :

$$t = \frac{PD}{2\cos(\alpha)(SE-0,6P)}$$

$$t = 52,90 \text{ mm}$$

$t < t_c$  Alors l'épaisseur minimale de la virole conique est acceptable selon le code ASME

### III.6.1.3 la virole inférieure

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer l'épaisseur minimale requis selon UG 27

$$t = \frac{P_c R}{SE-0,6P_c}$$

$$t = 47,31 \text{ mm}$$

$t < t_c$  Alors l'épaisseur minimale de la virole inférieure est acceptable selon le code ASME

### III.6.2 Le fond supérieur

Selon le code ASME 8 division I :

On peut calculer la minimale épaisseur requis selon UG32 :

$$t = \frac{P_c D}{2SE-0,2P_c}$$

$$t = 34,96 \text{ mm}$$

$t < t_c$  Alors l'épaisseur minimale du fond supérieur est acceptable selon le code ASME

### III.6.3 Le fond inférieur

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la minimale épaisseur requis selon UG 32 [15 (pages 30)] :

$$t = \frac{P_c D}{2SE-0,2P_c}$$

$$t = 46,91 \text{ mm}$$

$t < t_c$  Alors l'épaisseur minimale du fond inférieur est acceptable selon le code ASME



## III.7 La pression de travail maximale admissible

### III.7.1 La virole

#### III.7.1.1 La virole supérieure

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la pression de travail maximale admissible selon **UG 27**[15 (pages 20-21)] :

$$\text{MAWP} = \frac{SEt_c}{R+0,6t_c}$$

$$\text{MAWP} = 2,858 \text{ MPa}$$

#### III.7.1.2 La virole conique

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la pression de travail maximale admissible selon UG 27 [15 (pages 20-21)] :

$$\text{MAWP} = \frac{2SEt_c \cos(\alpha)}{D+1,2t_c \cos(\alpha)}$$

$$\text{MAWP} = 2,749 \text{ MPa}$$

#### III.7.1.3 La virole inférieure

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la pression de travail maximale admissible selon UG 27 [15 (pages 20-21)] :

$$\text{MAWP} = \frac{SEt_c}{R+0,6t_c}$$

$$\text{MAWP} = 2,77 \text{ MPa}$$

### III.7.2 Le fond supérieur :

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la pression de travail maximale admissible selon UG 32 [15 (pages 30)] :

$$\text{MAWP} = \frac{2SEt_c}{D+0,2t_c}$$

$$\text{MAWP} = 2,88\text{MPa}$$

### III.7.3 Le fond inférieur

Selon le code ASME 8 division I

On peut calculer la pression de travail maximale admissible selon UG 32 [15 (pages 30)] :

$$\text{MAWP} = \frac{SEt_c}{R+0,6t_c}$$

$$\text{MAWP} = 2,804 \text{ Mpa}$$

### III.8 Calcul de moment de vent

Le moment fléchissant est dû à l'action du vent sur toute la colonne. Pour calculer la poussée du vent, on divise la hauteur de la colonne en 5 tronçons :

- Le tronçon 1 de longueur  $h_1 = 10000 \text{ mm}$
- Le tronçon 2 de longueur  $h_2 = 10000 \text{ mm}$
- Le tronçon 3 de longueur  $h_3 = 10000 \text{ mm}$
- Le tronçon 4 de longueur  $h_4 = 10000 \text{ mm}$
- Le tronçon 5 de longueur  $h_5 = 9280 \text{ mm}$

Nous supposons que l'effet du vent se manifeste dans une direction horizontale et que la force est appliquée au centre de la zone, dont la distance par rapport au sol est :

- Pour le tronçon 1 :  $X_1 = 5000 \text{ mm}$
- Pour le tronçon 2 :  $X_2 = 15000 \text{ mm}$
- Pour le tronçon 3 :  $X_3 = 25000 \text{ mm}$
- Pour le tronçon 4 :  $X_4 = 35000 \text{ mm}$
- Pour le tronçon 5 :  $X_5 = 44640 \text{ mm}$

### III.8.1 Calcul de la poussée du vent

L'effort du vent est déterminé d'après la formule suivante :

$$P_i = K_i \cdot B_i \cdot q_i \cdot S_i \text{ [N]}$$

Avec

**K<sub>i</sub>** : Coefficient aérodynamique, qui dépend de la nature de l'écoulement c'est-à-dire du régime aérodynamique **K<sub>i</sub> = f(Re)**.

<b>R<sub>e</sub></b>	0,15.10 <sup>6</sup>	0,4.10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	1,5.10 <sup>6</sup>	2.10 <sup>6</sup>
<b>K</b>	1,2	0,45	0,45	0,6	0,6

**Re** : Nombre de Reynold

$$R_e = \frac{V_{air} \times D_{ex}}{\nu_{air}}$$

$\nu_{air}$  : la viscosité de l'air

$$\nu_{air} = 0,146 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

$V_{air}$  : La vitesse du vent (air),  $V_{air} = 3.3\sqrt{q}$  selon norme AFNOR

**AFNOR** : signifie "Association Française de Normalisation". Il s'agit de l'organisme national chargé du développement et de la promotion des normes en France.

**q** : Poussée spécifique du vent [kgf /m<sup>2</sup>]

**q<sub>i</sub>** : Poussée spécifique du vent,  $q_i = q_0 \cdot \theta_i$  [N/m<sup>2</sup>]

**q<sub>0</sub>** : Poussée spécifique au niveau du sol,  $q_0 = 450$  [N/m<sup>2</sup>], pour les côtières Algériennes

**θ<sub>i</sub>** : Coefficient de surcharge qui dépend de H

Et on a

- si **H ≤ 10** m alors **θ = 1**
- si **H > 10** m alors **θ = f(H)**

---

---

$H$ (m)	10→20	40	60	80	100	150
$\theta$	1,4	1,8	1,9	2,05	2,2	2,3

---

- Pour  $k_1=0,6$

$h_1 \leq 10$  m alors  $\theta_1 = 1$

$$q_1 = q_0 = 45 \text{ [kgf/m}^2\text{]} \quad V_{air} = 3.3\sqrt{45} = 22,14 \text{ [m/s]}$$

$$R_{e1} = \frac{22,14 \cdot 5,612}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 8,5 \cdot 10^6$$

- Pour  $k_2=0,6$

$h_2 \leq 10$  m alors  $\theta_1 = 1$

$$q_2 = q_0 = 45 \text{ [kgf/m}^2\text{]} \quad V_{air} = 3.3\sqrt{45} = 22,14 \text{ [m/s]}$$

$$R_{e2} = \frac{22,14 \cdot 5,612}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 8,5 \cdot 10^6$$

- Pour  $k_3=0,6$

$$R_{e3} = \frac{22,14 \cdot 5,612}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 8,5 \cdot 10^6$$

- Pour  $k_4=0,6$

$$R_{e4} = \frac{22,14 \cdot 5,612}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 8,5 \cdot 10^6$$

- Pour  $k_5=0,6$

$h_5 \leq 10$  m alors  $\theta_1 = 1$

$$R_{e5} = \frac{22,14 \cdot 4,186}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 6,34 \cdot 10^6$$

$\beta_i$  : Coefficient d'augmentation de la poussée spécifique qui tient compte de l'action dynamique du vent sur l'appareil

$$B_i = 1 + \varepsilon m_i$$

Avec

$m_i$  : coefficient de pulsation du vent qui dépend de H.

H(m)	0 à 20	40	60	80	100 à 120
m	0,35	0,32	0,28	0,25	0,21

$h_1 \cdot h_5 \leq 20$  alors  $m=0.35$

$\varepsilon$ : Coefficient de dynamique qui dépend de la période T des oscillations propres de l'appareil

Et on a  $\varepsilon=f(T)$

- Si  $T \leq 0.25$  [s] alors  $\varepsilon = 1$
- Si  $T > 0.25$  [s] alors  $\varepsilon = f(T)$

$\varepsilon$	1.5	1.75	2	2.5	3	3.1	3.1
T [s]	0.5	1	1.5	2.75	4	5	6

Détermination de la période des oscillations propres de la colonne T

$$T=1.79. H_c \sqrt{\frac{Q_{max}.H_c}{g.E.I}}$$

$Q_{max}$  : Charge maximale :  $Q_{max} = 12510000$  [N]

$E$ : Module de Young,  $E = 2.10^{11}$  [N/m<sup>2</sup>]

$I$  : Moment d'inertie de la section de la jupe en m<sup>4</sup>

$$I = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4)$$

$d_{ext}$  : Diamètre extérieur de la jupe,  $d_{ext} = 5600$  [mm]

$d_{int}$  : Diamètre intérieur de la jupe,  $d_{int} = 5520$  [mm]

$H_c$  : La hauteur de la colonne

$g$  : La gravité

$$I = \frac{\pi}{64} (5,600^4 - 5,520^4) = 2,7 \text{ m}^4$$

$$T = 1.79. 49,48 \sqrt{\frac{12510000 \cdot 49,48}{9,81 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2,7}}$$

$T = 0,96$  [s]      alors       $\varepsilon = 1,75$

Avec :

$$B_i = 1 + \varepsilon m_i$$

$$B_i = 1,6$$

**Si** : La surface face au vent

Avec  $S_i = H \times D$ . (pour tenir compte de la poussée du vent qui s'exerce sur les charpentes métalliques en augmente le diamètre de l'appareil de 20%).

**D** : Diamètre extérieur de l'appareil y compris le calorifugeage.

Ainsi on aura :

$$D = (D_{\text{ext}} + 2 \times \text{calorifuge}) \times 1,2$$

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_4$$

- $D = 5612 + 150 = 5762 \text{ mm}$        $S_{1,2,3,4} = 5,762 \times 10 \times 1,2 = 69,15 \text{ m}^2$
- $D = 4186 + 150 = 4336 \text{ mm}$        $S_5 = 4,336 \times 1,2 \times 9,28 = 48,286 \text{ m}^2$

Les valeurs de l'effort du vent pour chaque tronçon :

- $P_{1,2,3,4} = 0,6 \times 1,6 \times 450 \times 69,15 = 29872,8 \text{ N}$
- $P_5 = 0,6 \times 1,6 \times 450 \times 48,286 = 20859,552 \text{ N}$

Calcul des moments fléchissant :

$$M_v = \sum_{i=1}^n P_i \times X_i$$

- $M_1 = P_1 \times X_1 = 29872,8 \times 5 = 149364 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $M_2 = P_2 \times X_2 = 29872,8 \times 15 = 448092 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $M_3 = P_3 \times X_3 = 29872,8 \times 25 = 746820 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $M_4 = P_4 \times X_4 = 29872,8 \times 35 = 1045548 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $M_5 = P_5 \times X_5 = 20859,552 \times 44,64 = 931170,40 \text{ N}\cdot\text{m}$

Donc :

$$M_v = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = 3343258,45 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### III.9 L'essai hydrostatique

L'essai hydrostatique a pour objectif de révéler les défauts de fabrication des colonnes et de détecter d'éventuelles fuites. Cependant, il convient de noter que la plupart des défauts de soudure ne peuvent pas être détectés par l'essai hydrostatique et nécessitent d'autres types d'essais non destructifs.

#### III.9.1 La résistance du fond inférieur lors de l'essai hydrostatique

La condition de résistance du fond lors de l'essai hydrostatique est la suivante

On calcule la contrainte maximale au fond inférieur avec la même relation utilisée précédemment en considérant la pression de l'essai hydrostatique.

$$\sigma_{fond} = \sigma_{\varphi} = \frac{P_c \times R^2}{2th}$$

Alors :

Selon ASME 8 dévision I (UG 99), API 510 Page 31:

On utilise 30% pour les équipements fabriqués après l'année 1999.

$$P_{essai} = P_c + 30\%P_c \quad \text{III.25}$$

$$P_{essai} = 3.055 \text{ MPa}$$

Avec :

$P_c$ : La pression du fond inférieur

$$P_c = P_{st} + P_{essai}$$

Avec :

$P_{essai}$ : Pression d'essai hydrostatique

$P_{st}$ : Pression de l'eau contenue dans la colonne.

$P_c$ : Pression de désigne

$P_c = 2.35 \text{ MPa}$  (selon manuelle de constructeur)



### III.9.2 Calcul de pression hydrostatique

$$P_{st} = \rho g H$$

**H**: La hauteur de la colonne

**g**: L'accélération de pesanteur

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

**$\rho$** : Densité de liquide utilisé dans le test hydrostatique

Pour cet essai on utilise l'eau :

$$\rho_{eau} = 997 \text{ kg/m}^3$$

Alors:

$$P_{st} = 0.481 \text{ MPa}$$

Ce qui donne:

$$P_c = 3.055 + 0.481$$

$$P_c = 3.536 \text{ MPa}$$

### III.9.3 La contrainte maximale au fond inférieur

$$\sigma_{fond} = \sigma_{\varphi} = 173.26 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\varphi} < \sigma_e^{tc}$$

Donc la résistance du fond à l'essai hydrostatique est vérifiée.

## **Chapitre IV**

### **Modélisation numérique**

## IV.1 Introduction

La modélisation numérique permet d'étudier la résistance des équipements sous divers types de chargements afin de déterminer plusieurs paramètres, notamment la vitesse, le déplacement, la contrainte et la température. Divers logiciels sont disponibles pour modéliser et analyser les récipients sous pression, parmi lesquels SolidWorks se distingue.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé SolidWorks pour modéliser les différentes parties d'une colonne de distillation, en nous basant sur le dessin technique fourni par le complexe GP1Z de la colonne de distillation de fractionnement 32-V-7101.

## IV.2 Modélisation par SolidWorks

Différentes fonctions peuvent être utilisées pour générer la virole et la tubulure en forme 3D (bossage avec rotation, enlèvement de la Matière avec rotation) Selon les étapes suivantes :

Pour modéliser la virole, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Nous avons tracé un axe de rotation et une ligne avec les cotations de la virole (rayon, longueur)
- Nous avons utilisé des déclarations d'entités pour définir l'épaisseur de la virole et ajouté un anneau de support.
- Finalement nous avons utilisé la fonction de bossage avec rotation

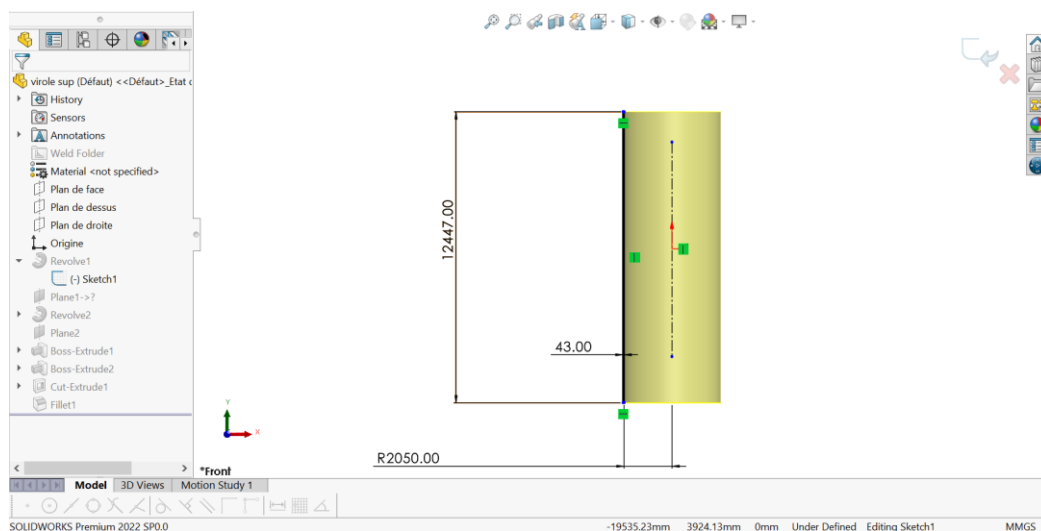


Figure IV 1-La création du dessin de la virole par les différents outils de SolidWorks

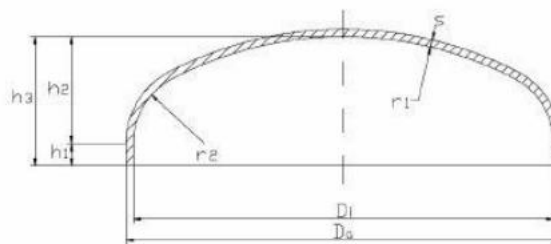
### IV.3 Modélisation de la colonne à fond elliptique

Cette colonne est constituée de :

- Deux fonds (supérieur et inférieur)
- Deux viroles cylindriques avec des diamètres différents
- Une virole conique

#### IV.3.1 Modélisations des fonds de la colonne

##### Ellipsoidal head



##### Form 2:1

$$\begin{aligned} D_i &= D_a - 2 \times s \\ r_1 &= 0,9 \times D_i \\ r_2 &= 0,17 \times D_i \\ h_1 &= \text{gem. Angabe} \\ h_2 &= 0,25 \times D_i \\ h_3 &= h_1 + h_2 \end{aligned}$$

##### Form 1,9:1

$$\begin{aligned} D_i &= D_a - 2 \times s \\ r_1 &= D_i / 1,16 \\ r_2 &= D_i / 5,39 \\ h_1 &= \text{gem. NF E81-103} \\ h_2 &= D_i / 3,8 \\ h_3 &= h_1 + h_2 \end{aligned}$$

#### IV.3.1.1 Le fond supérieur

En utilisant le code ASME pour calculer les deux rayons différents du fond supérieur de la colonne :

On a :

$$r_1 = 4100 \times 0.9$$

$$r_1 = 3690 \text{ mm}$$

Et :

$$r_2 = 4100 \times 0.17$$

$$r_2 = 697 \text{ mm}$$

### IV.3.1.2 Le fond inférieur :

En utilisant le code ASME pour calculer les deux rayons différents du fond inférieur de la colonne :

On a :

$$r_1 = 5500 \times 0.9$$

$$r_1 = 4950 \text{ mm}$$

Et :

$$r_2 = 5500 \times 0.17$$

$$r_2 = 935 \text{ mm}$$

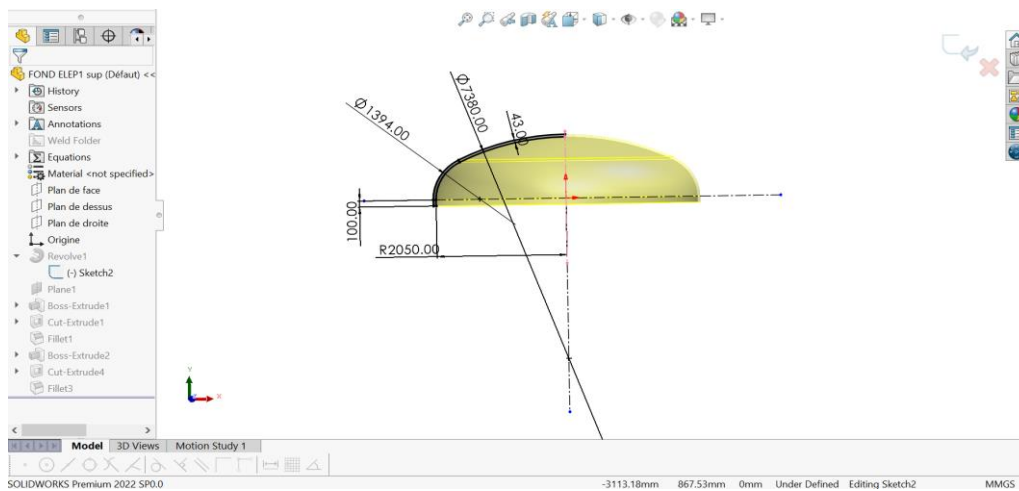


Figure IV 2-Modélisation du fond supérieur par SolidWorks

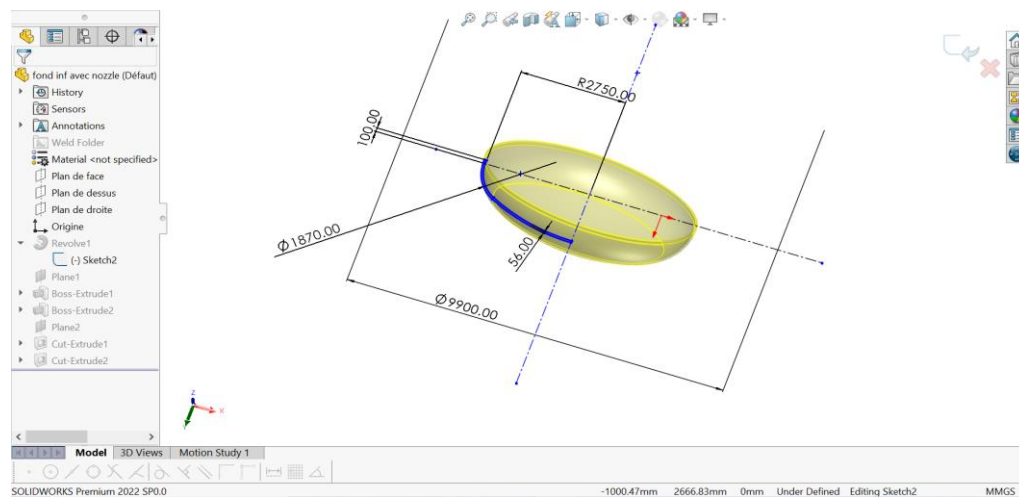


Figure IV 3-Modélisations du fond inférieur par SolidWorks

### IV.3.2 Modélisation des viroles de la colonne

Pour modéliser chaque virole, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Nous avons tracé un axe de rotation et une ligne avec les cotations de la virole (rayon, longueur)
- Nous avons utilisé des déclarations d'entités pour définir l'épaisseur de la virole
- Finalement nous avons utilisé la fonction de bossage avec rotation

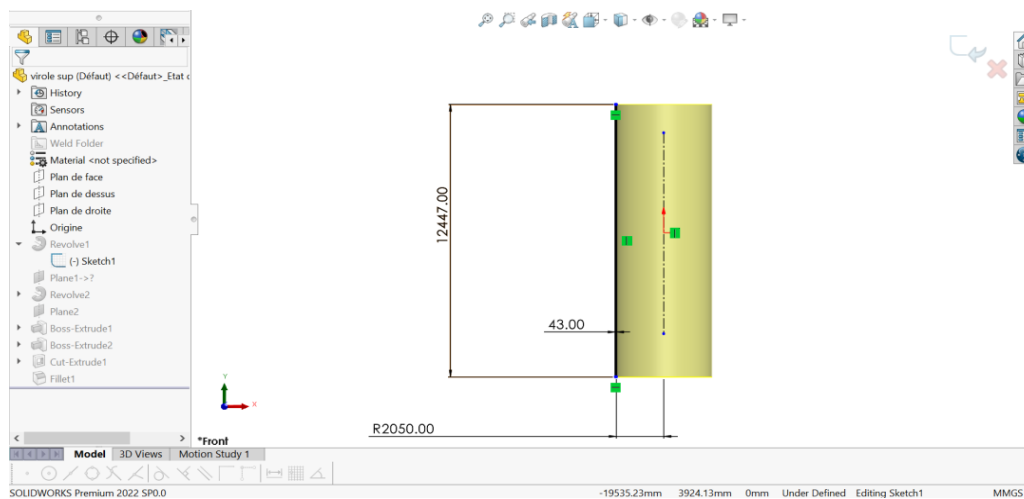


Figure IV 4-Modélisation de la virole supérieure par SolidWorks

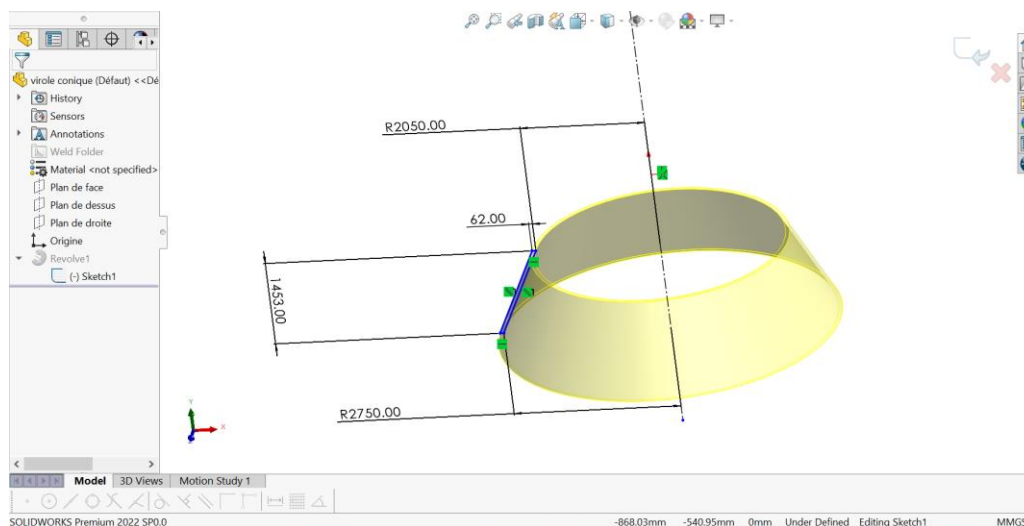


Figure IV 5-Modélisation de la virole conique par SolidWorks

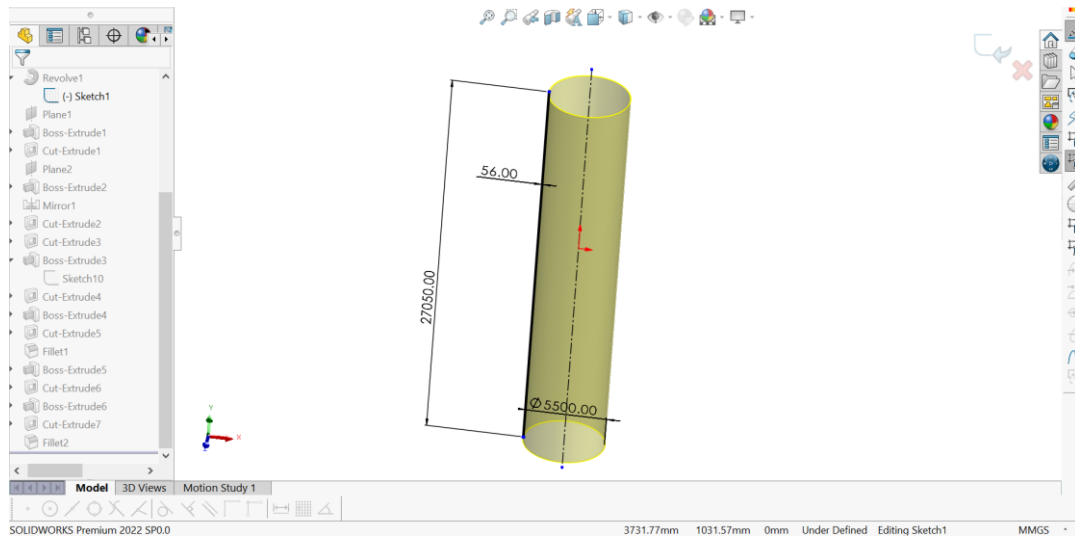


Figure IV 6-Modélisation de la virole inférieure par SolidWorks

### IV.3.3 Assemblage

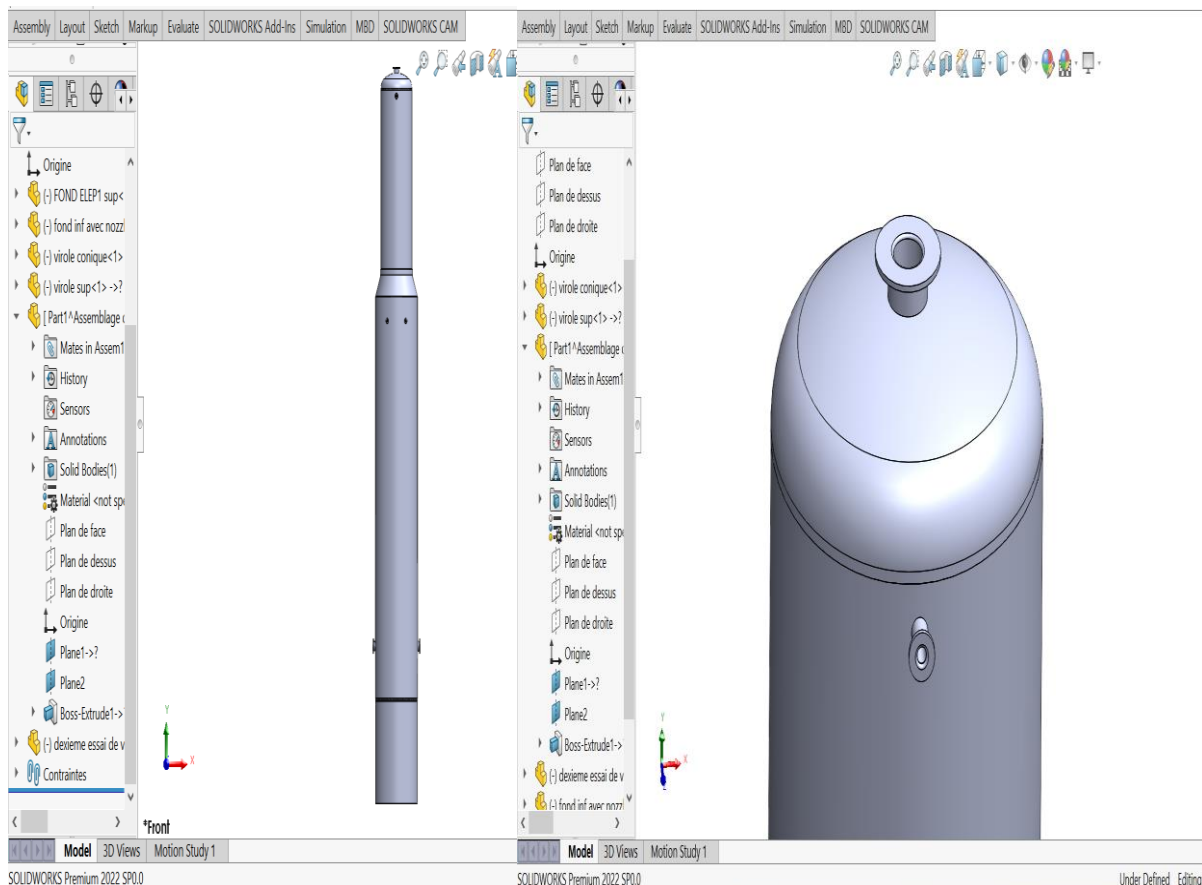
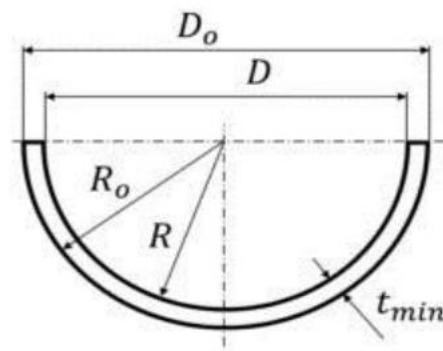


Figure IV 7-L'assemblage de la colonne à fond elliptique

## IV.4 Modélisation de la colonne avec différents fonds

### IV.4.1 Modélisation de la colonne à fond hémisphérique



On a :

$$R_o = 0.5 D_o$$

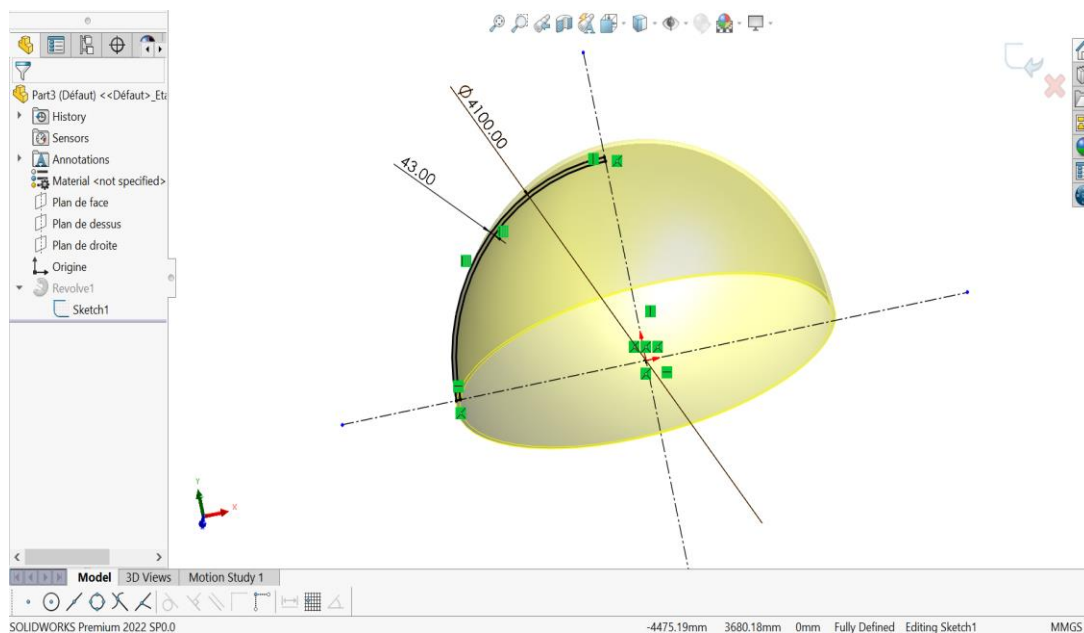


Figure IV 8-Modélisation du fond hémisphérique par SolidWorks



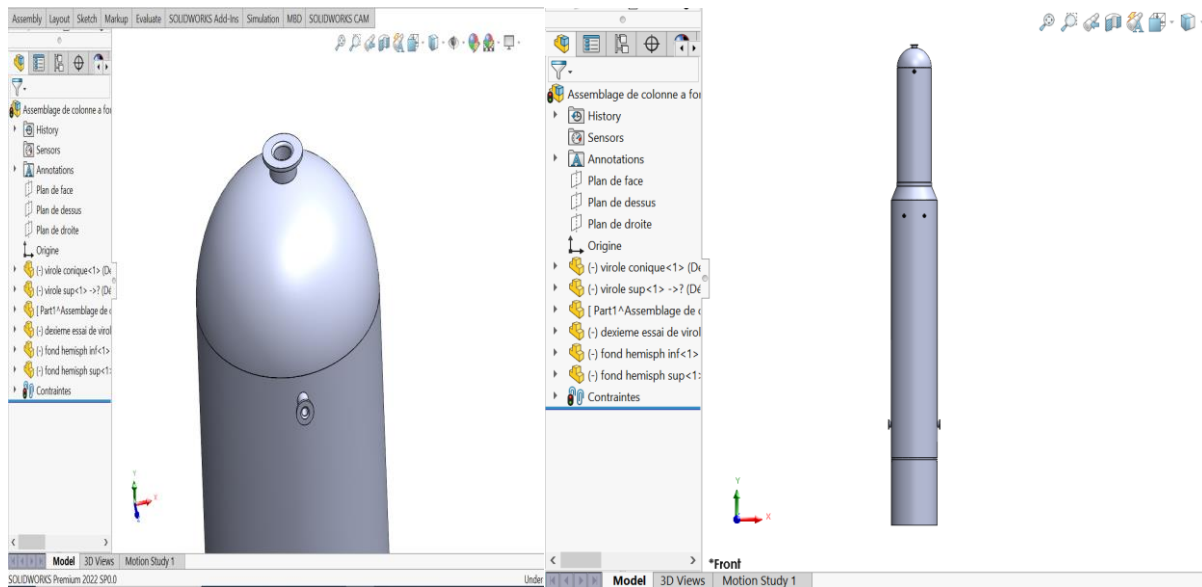
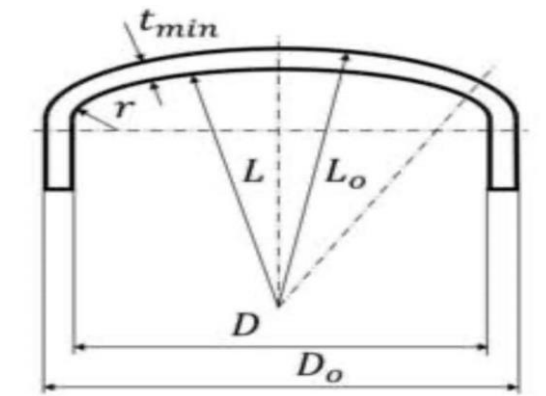


Figure IV 9-L'assemblage de la colonne à fond hémisphérique

#### IV.4.2 Modélisation de la colonne à fond Tori-sphérique



On a :

$$L = D_0$$

$$r = 0,06 \times D_0$$

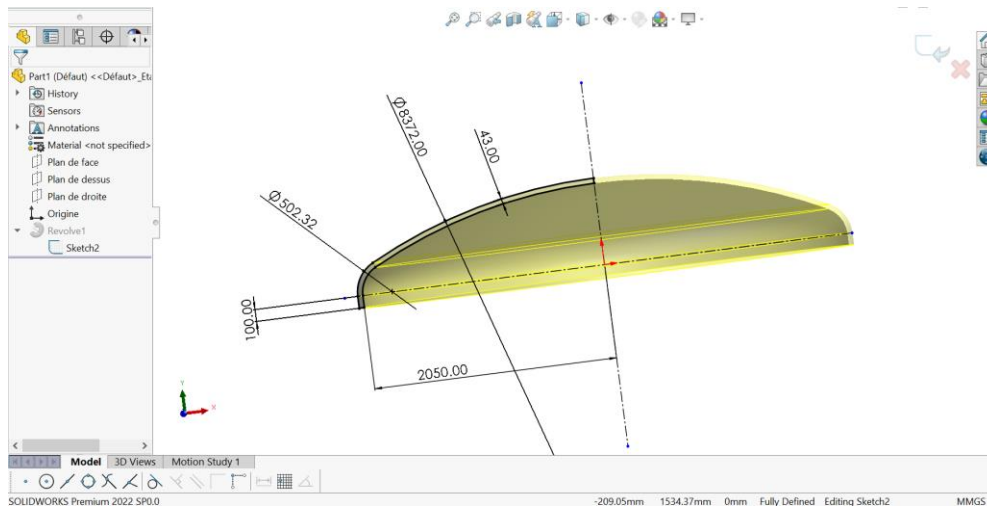


Figure IV 10-Modélisation du fond Tori sphérique par SolidWorks

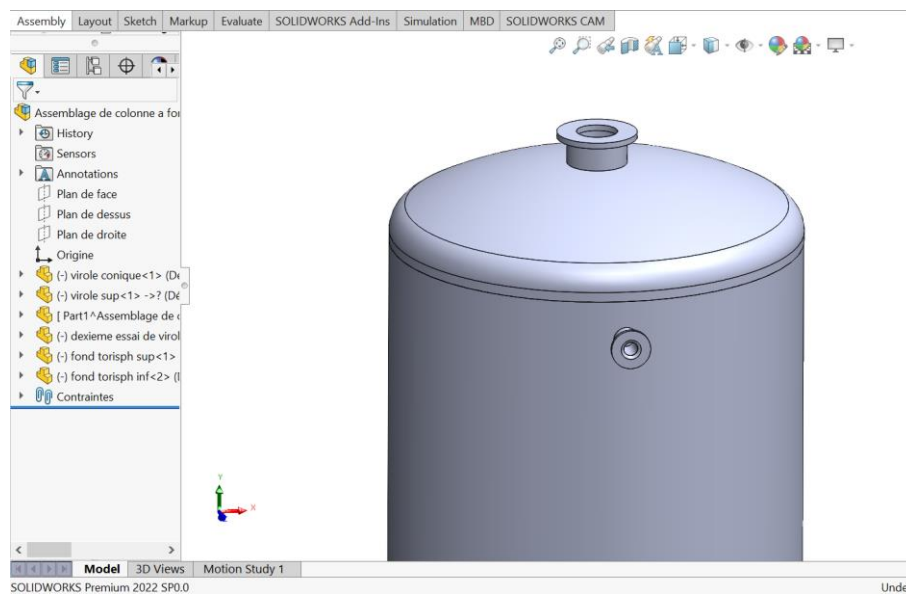


Figure IV 11-L'assemblage de la colonne à fond Tori sphérique

## IV.5 Les étapes de la simulation

### IV.5.1 La première étape

1. On ouvre ANSYS Workbench
2. On ouvre statique structural
3. On considère steady-state thermal en parallèle avec static structural

4. On ouvre « engineering data » et en sélectionne le matériau l'acier inoxydable « Structural steel »
5. En importe la géométrie et en ouvre le modèle

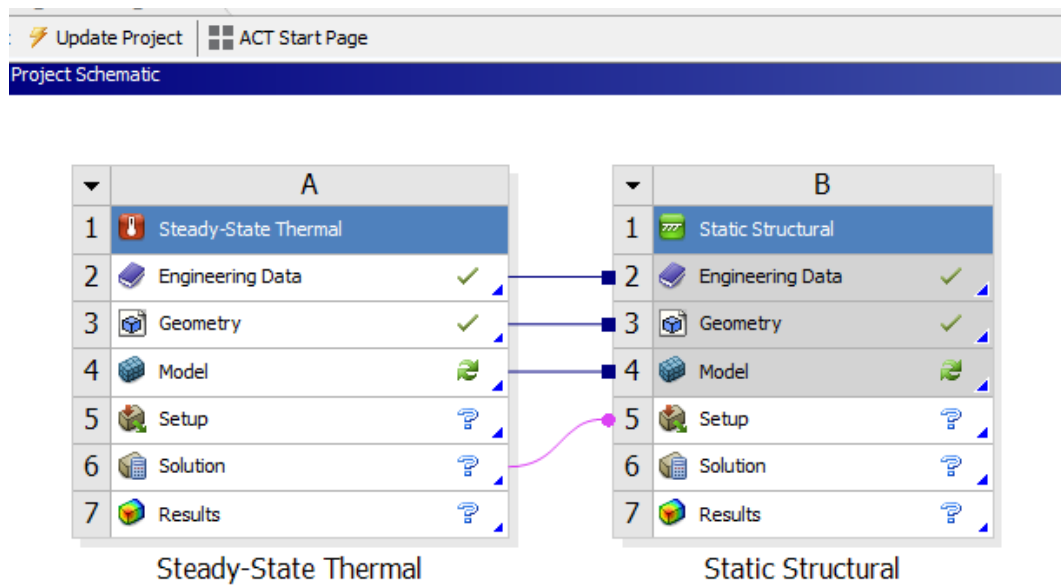


Figure IV 12-L'onglet d'ouverture des programmes static structural et steady-state thermal

Outline of General Materials					
	A	B	C	D	E
1	Contents of General Materials	Add		Source	Description
7	FR-4	+		General_Materials.xml	illustrative purposes. It is assumed that the material x direction is the length -wise (LW), or warp yarn direction, while the material y direction is the cross -wise (CW), or fill yarn direction.
8	Gray Cast Iron	+		General_Materials.xml	
9	Magnesium Alloy	+		General_Materials.xml	
10	Polyethylene	+		General_Materials.xml	
11	Silicon Anisotropic	+		General_Materials.xml	
12	Stainless Steel	+		General_Materials.xml	
13	Structural Steel	+		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
14	Titanium Alloy	+		General_Materials.xml	

Figure IV 13-Le choix du matériau dans ANSYS Workbench

#### IV.5.2 La deuxième étape

Après l'ouverture du modèle on :

1. Génère le maillage avec un nombre des noeuds de 289688 (voire e choix du maillage)
2. Sélectionne un support fixe pour la colonne (la surface de contact de la jupe avec le sol)

3. Applique une pression à tous les parois internes de la colonne
4. Ajoute une température interne à la colonne
5. Pour les outputs on a choisi la contrainte maximale de von mises et le déplacement totale (on peut choisir d'autres)
6. On clique sur solve (résoudre)

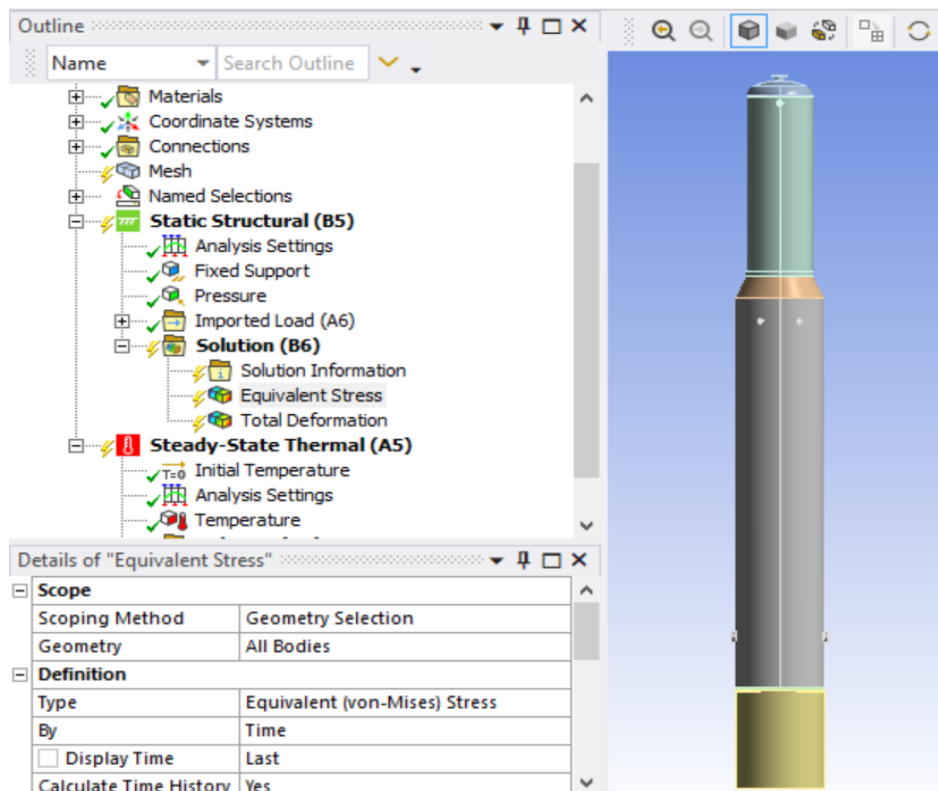


Figure IV 14-L'ajout des conditions : support fixe-pression-température

### IV.5.3 La dernière étape

On peut voir tous les résultats qu'on a considéré (donne notre cas en vas voir la contrainte maximale et le déplacement totale)

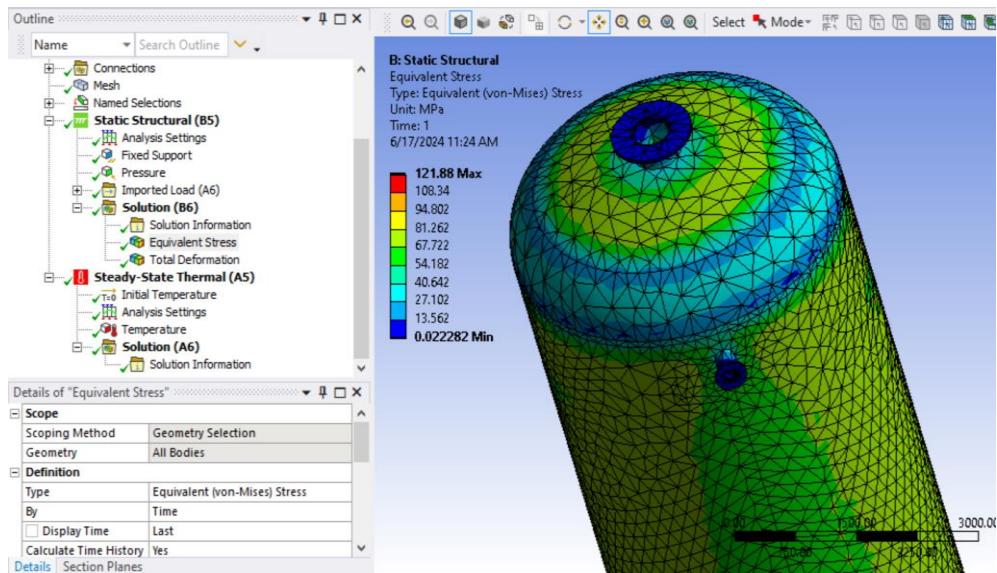


Figure IV 15-Les résultats de la simulation

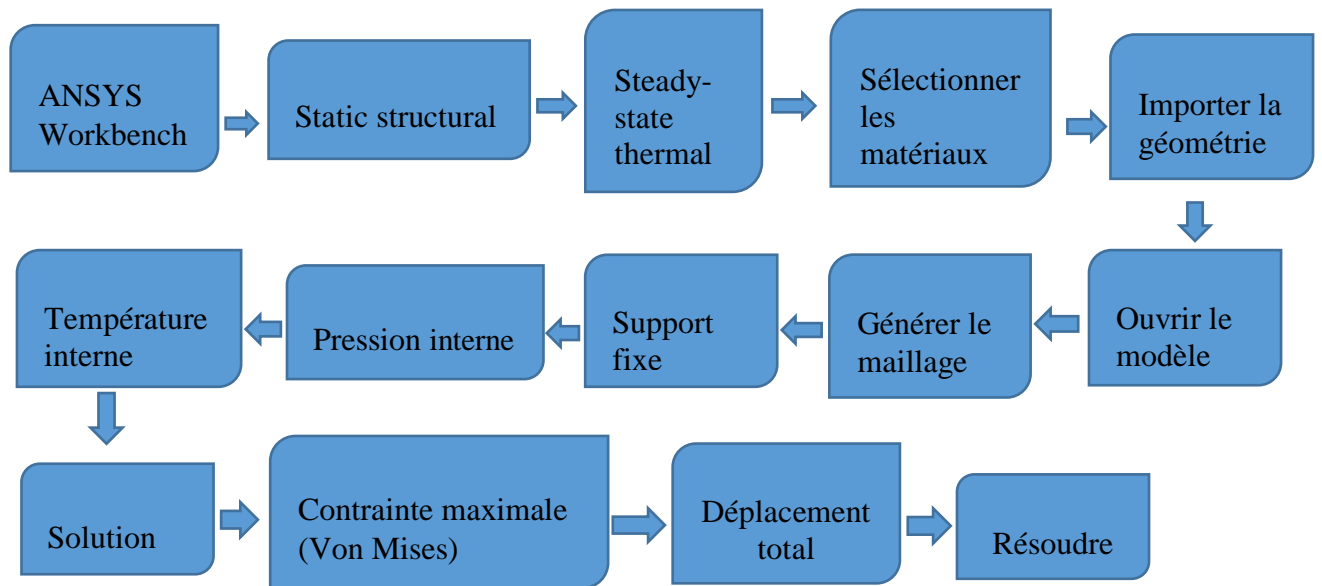


Figure IV 16-Schéma des étapes de simulation par le logiciel ANSYS

# **Chapitre V**

## **Résultats et interprétations**

## V.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter, analyser et discuter les résultats obtenus par les simulations, en tenant compte de trois types de fonds de colonnes. Avant de présenter et de discuter ces résultats, plusieurs scénarios ont été considérés afin de comparer les résultats numériques avec la solution analytique, dans le but de valider l'approche numérique.

## V.2 Le choix du maillage

Pour sélectionner un maillage optimal pour notre colonne, le nombre d'éléments a été varié tout en observant la variation de la contrainte maximale. Lorsque le changement du nombre d'éléments n'affecte plus la variation des résultats, le nombre d'éléments optimal est déterminé. Pour ce faire, une pression fixe a été considérée et le nombre d'éléments a été modifié à plusieurs reprises, en observant la variation des résultats de la simulation (contrainte).

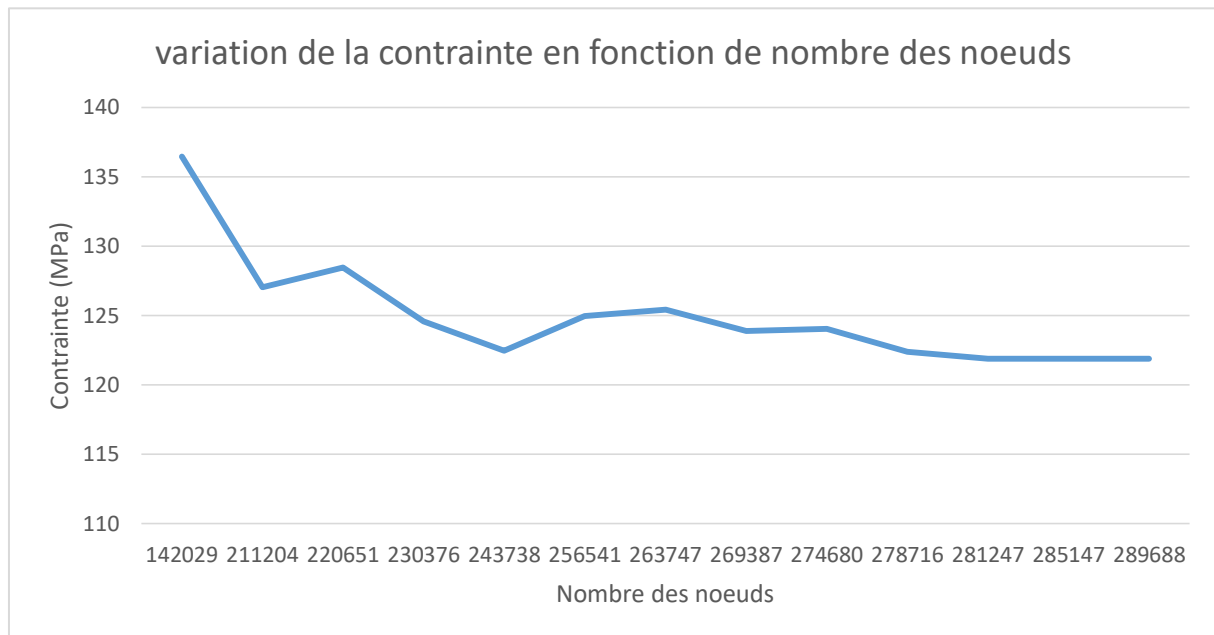
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V 1-le choix optimal de maillage

La pression (MPa)	Taille d'éléments (mm)	Nombre d'éléments	Nombre des noeuds	Contrainte (MPa)
<b>2.35</b>	450	70936	142029	136.44
	360	106266	211204	127.03
	350	111598	220651	128.45
	340	116598	230376	124.55
	330	123516	243738	122.47
	320	129899	256541	124.95
	310	133175	263747	125.43
	300	135711	269378	123.88
	295	138316	274680	124.03
	291	140352	278716	122.38
	290.4	141589	281247	121.88
	<b>290</b>	<b>146114</b>	<b>289688</b>	<b>121.88</b>

Les résultats de ce tableau nous ont permis de réaliser le graphe suivant :

Figure V 1-Graphe du choix optimal de maillage



Les résultats du tableau et ce graphe nous a permis de déterminer le nombre d'éléments nécessaire pour avoir les meilleurs résultats de nos simulations.

Alors le maillage adopté a les caractéristiques suivantes :

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Display	
Display Style	Use Geometry Setting
<input type="checkbox"/> Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	290.0 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
<input checked="" type="checkbox"/> Inflation	
<input checked="" type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	289688
<input type="checkbox"/> Elements	146114

Figure V 2-Propriétés de maillage



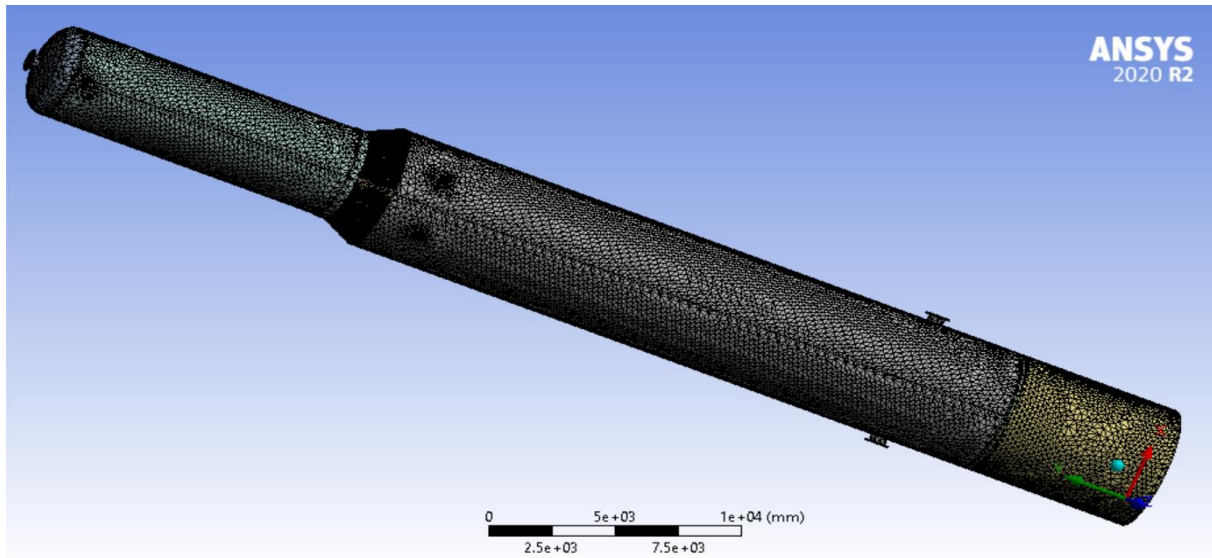


Figure V 3-Maillage de la colonne à fond elliptique

### V.3 Evaluation de la contrainte circonférentielle par simulation

En utilisant le programme de simulation ANSYS Workbench, nous avons réalisé une analyse structurelle statique de la colonne, ce qui implique que le corps est dans un état rigide, fixé en un point, et que la charge appliquée est très lente.

Pour déterminer la contrainte circonférentielle, une coupe a été effectuée dans les différentes sections de la colonne selon l'axe "Z". Ensuite, une pression interne a été appliquée pour observer les résultats de la contrainte maximale résultante dans chaque partie de la colonne.

#### V.3.1 Simulation des contraintes agissant sur les parois des différentes parties de la colonne ainsi que l'essai hydrostatique

##### V.3.1.1 fond supérieur

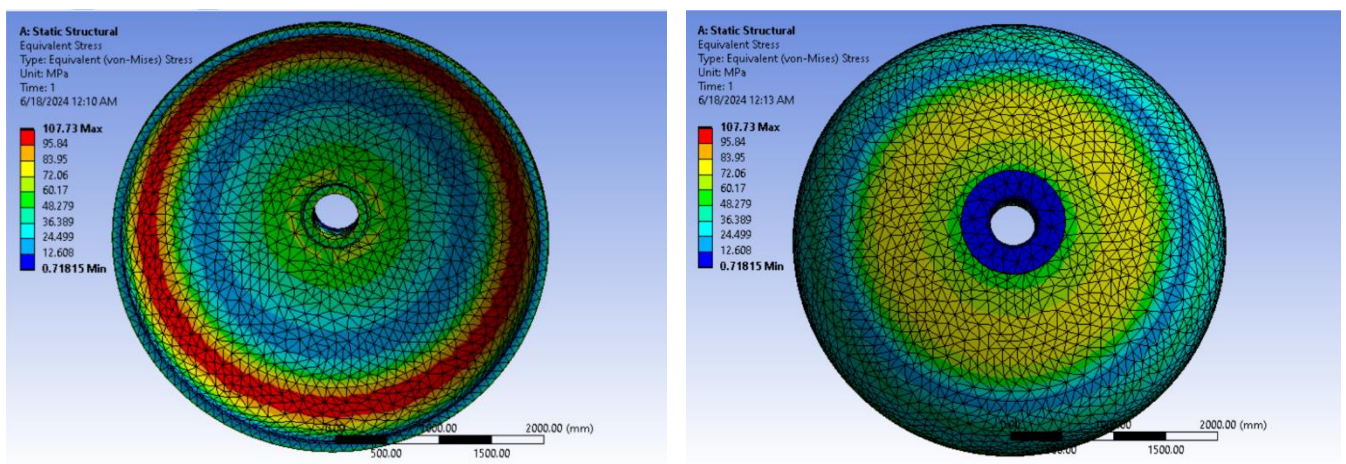


Figure V 4-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond supérieur

On peut voir que la valeur de la contrainte varie entre 0,71815 MPa et 107,73 MPA, cette contrainte est distribuée sur toute les parois internes et externes du fond. La face inférieure du fond est une face de contact avec la virole de la colonne

La contrainte maximale présente sur l'intérieur du bord circulaire égale à **107,73 MPa**.

### V.3.1.2 virole supérieure

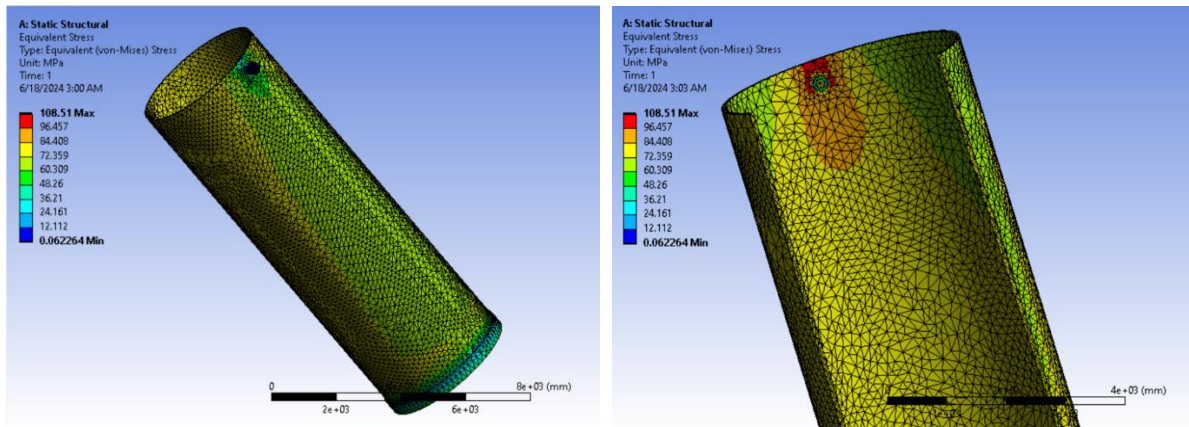


Figure V 5-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole supérieure

On voit que la contrainte varie entre 0,062264 MPa et 108,51 MPa, où cette contrainte est distribuée sur les parois internes et externes de la colonne. Les zones en bleu indiquent une contrainte très faible grâce aux anneaux de renfort. Également, la surface de contact entre cette virole et le fond supérieur présente une contrainte maximale de 108,51 MPa, aussi autour des tubulaires.

Il est à noter que, la surface de contact entre la virole et le fond supérieur est un joint de soudure.

### V.3.1.3 virole conique

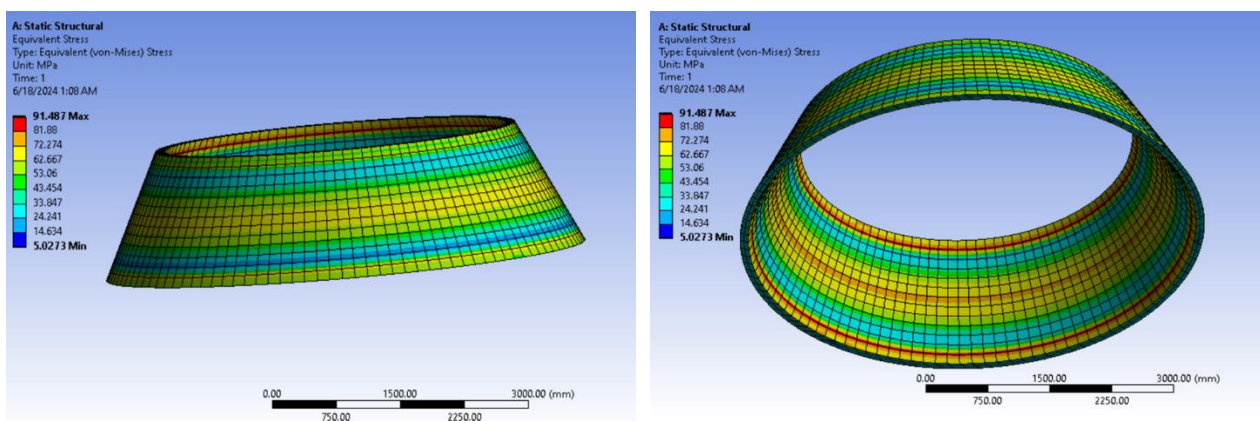


Figure V 6-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole conique

On voit que la contrainte est comprise entre **5,0273 MPa** et **91,487 MPa**, où elle est distribuée sur les parois interne et externes de la virole.

### V.3.1.4 virole inférieure

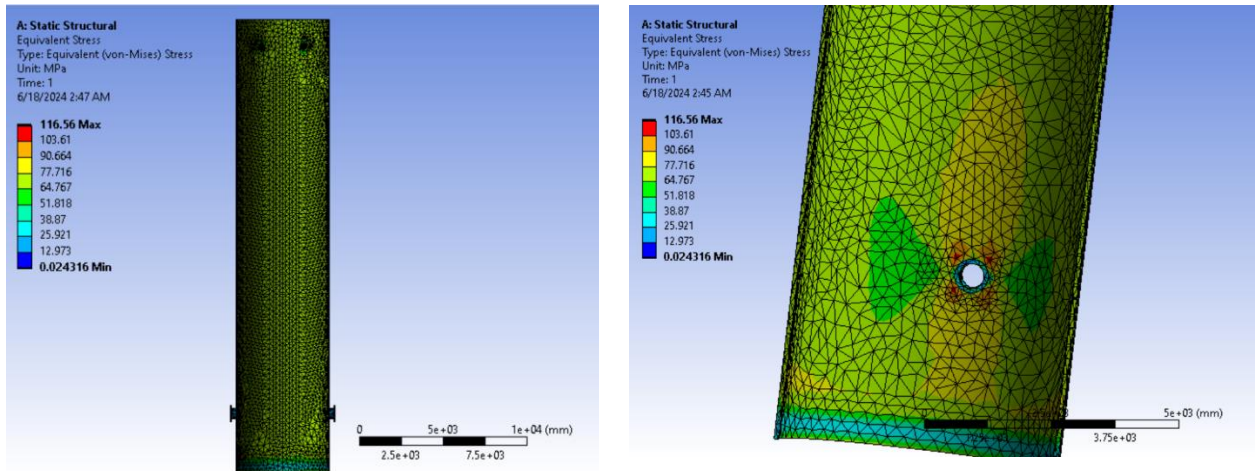


Figure V 7-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole inférieure

La contrainte varie entre **0,024316 MPa** et **116,56 MPa**, elle est distribuée sur les parois de la colonne et présente une valeur maximale de **116,56 MPa** proche de la tubulure grâce au changement de l'épaisseur.

Les tubulures sont renforcées par le constructeur (l'épaisseur des tubulures est plus grande que les parois de la colonne).

### V.3.1.5 fond inférieur

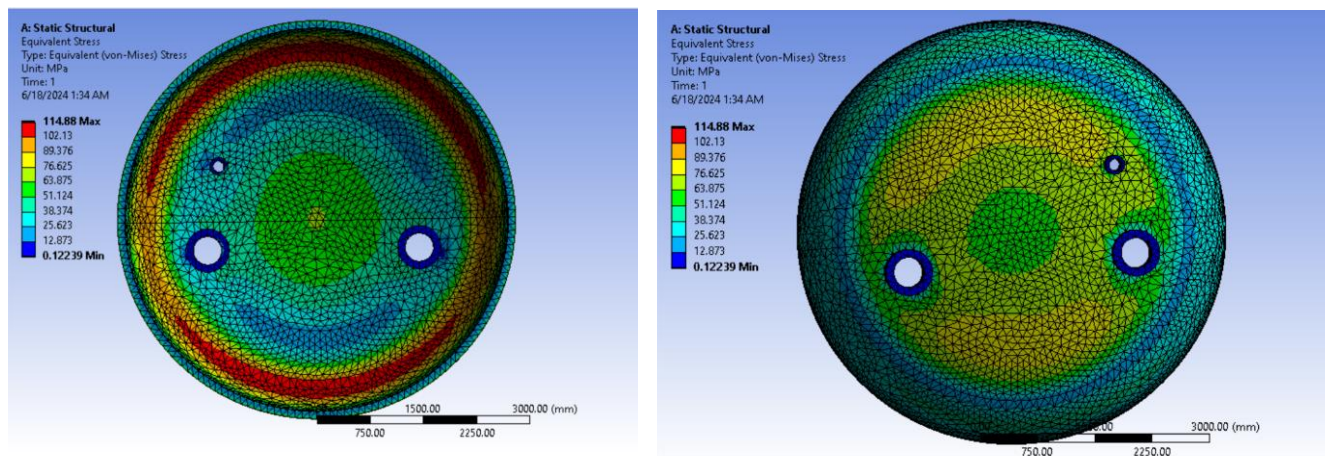


Figure V 8-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond inférieur

On peut voir que la valeur de la contrainte varie entre **0,12239** MPa et **114,88** MPa, cette contrainte est distribuée sur toute les parois internes et externes du fond. La face inférieure du fond est une face de contact avec la virole de la colonne

La contrainte maximale présente sur l'intérieur du bord circulaire égale à **114,88** MPa.

### V.3.1.6 L'essai hydrostatique

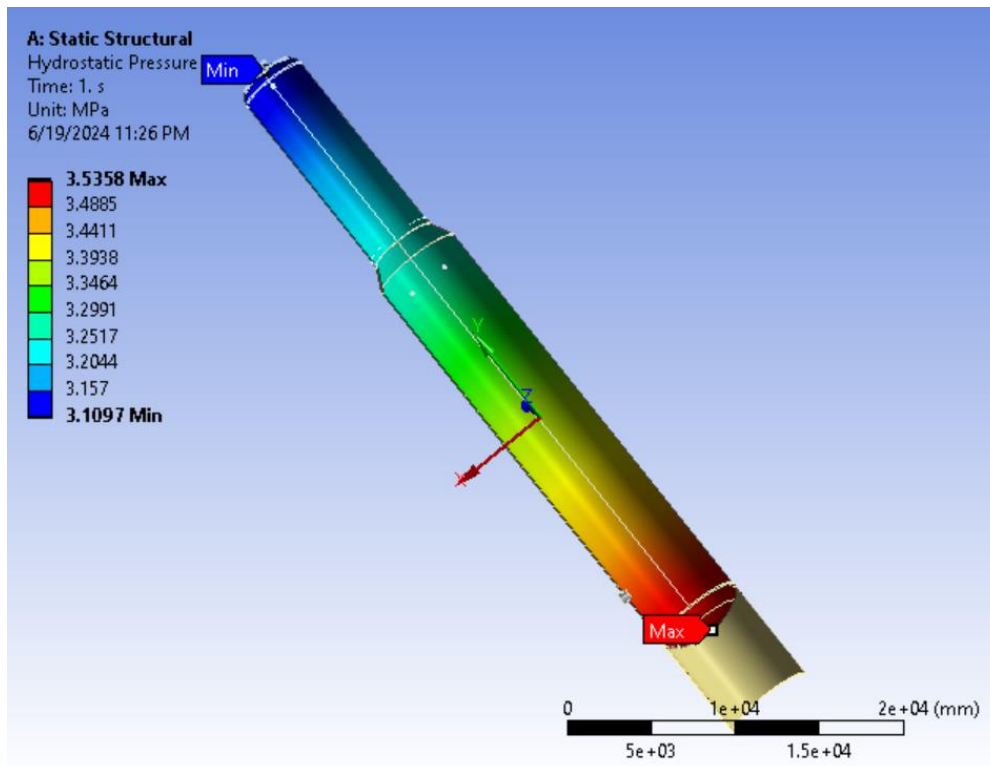


Figure V 9-Pression hydrostatique appliquée sur l'intérieur de la colonne

Details of "Hydrostatic Pressure"	
<b>Definition</b>	
Type	Hydrostatic Pressure
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> Fluid Density	1000. kg/m <sup>3</sup>
Suppressed	No
<b>Hydrostatic Acceleration</b>	
Define By	Components
<input type="checkbox"/> X Component	0. m/s <sup>2</sup> (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	9.81 m/s <sup>2</sup> (ramped)

Figure V 10-Conditions de l'essai hydrostatique

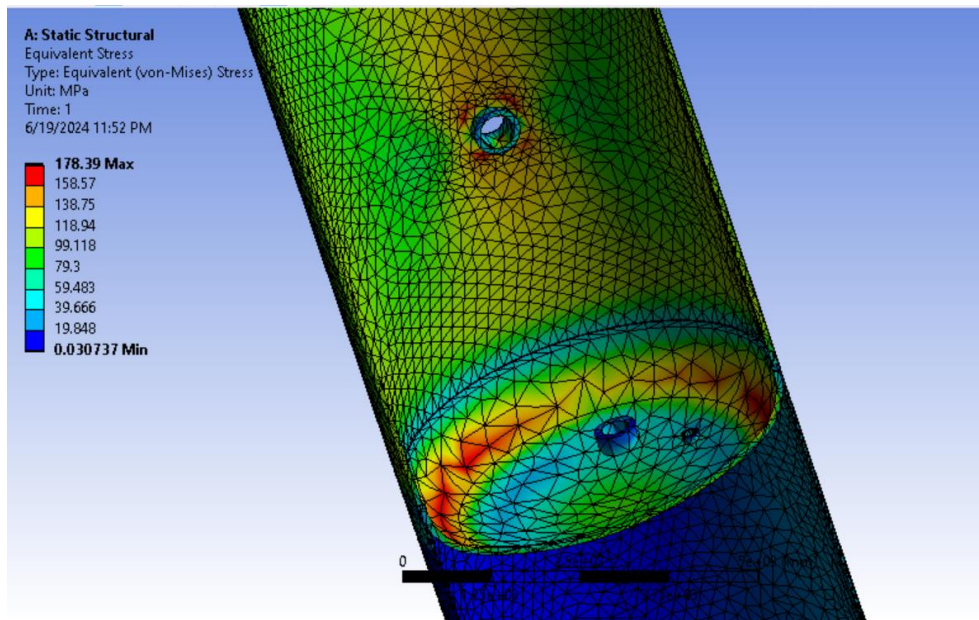


Figure V 11-Contrainte maximale à l'intérieur de la colonne

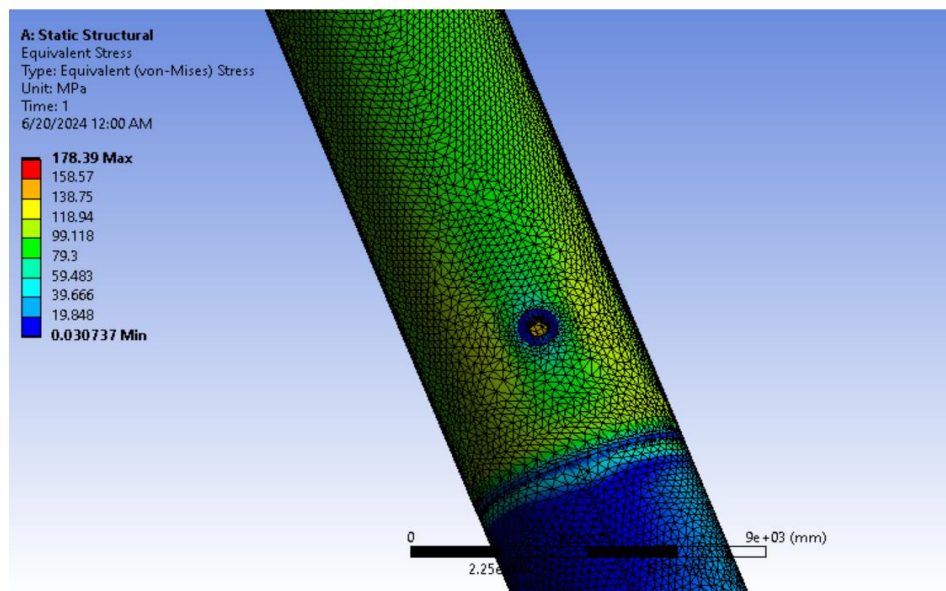


Figure V 12-Contrainte maximale l'extérieur de la colonne

D'abord on va appliquer une pression hydrostatique sur tous les parois internes de la colonne

La valeur de la contrainte maximale varie entre **0,030737** MPa et **178,39** MPa sur la paroi de la colonne.

La concentration de la contrainte est loin de joint de soudure et loin du fond inférieur, elle est

Le tableau suivant résume les résultats obtenus de la simulation dans chaque partie de la colonne ainsi que les résultats de l'essai hydrostatique.

Tableau V 2-Les résultats de la simulation

<b>La pièce de la colonne</b>	<b>La contrainte maximale obtenue par simulation (MPa)</b>
Le fond supérieur	107.73
La virole supérieur	108.51
La virole conique	91.487
La virole inférieur	116.56
Le fond inférieur	114.88
L'essai hydrostatique	178.39

### V.3.2 Interprétation

Selon l'équation définie dans le troisième chapitre, la contrainte circonférentielle est liée à la pression, au diamètre et surtout à l'épaisseur de la paroi. D'après les résultats de la simulation, on observe que la valeur de la contrainte augmente proportionnellement à la diminution de l'épaisseur.

Le fond inférieur peut résister aux contraintes induites par l'essai hydrostatique, et la valeur de la contrainte maximale reste inférieure à la limite élastique. Tous les résultats obtenus pour les contraintes dans les différentes parties de la colonne sont inférieurs à la limite élastique, ce qui signifie que ces résultats sont acceptables.

### V.3.3 Validation des résultats

Le tableau suivant présente les résultats des simulations et les résultats analytiques de la contrainte maximale exercée sur les parois dans les différentes sections de la colonne, ainsi que les résultats de l'essai hydrostatique. Cela permet de comparer les deux types de résultats et de déterminer le pourcentage d'erreur entre eux, afin de valider l'approche numérique adoptée dans notre étude.

Tableau V 3-Comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations

Les pièces de la colonne	La contrainte membranaire		L'erreur %
	Analytique (MPa)	Simulation (MPa)	
Le fond supérieur			1.048
La virole supérieure	106.6	107.73	3.24
La virole conique	112.034	108.51	0.57
La virole inférieure	90.96	91.487	0.99
Le fond inférieur	115.40	116.56	0.23
L'essai hydrostatique	115.15	114.88	2.87
	173.26	178.39	

Pour bien illustrer la comparaison entre les deux approches nous avons tracé la courbe suivante qui illustre les résultats du tableau précédent :

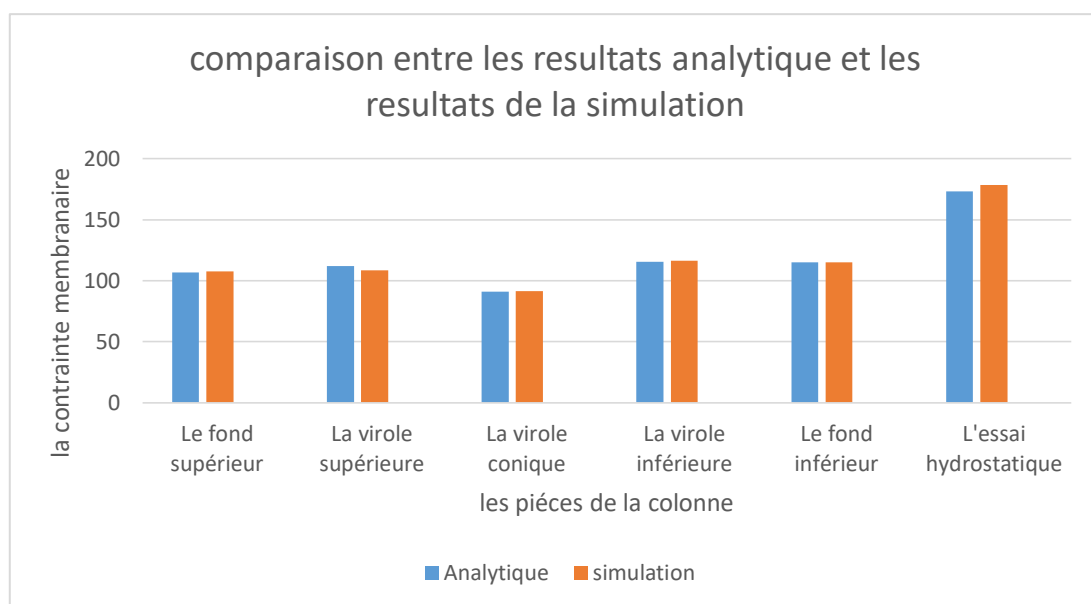


Figure V 13-Diagramme de comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations

Le diagramme précédent illustre clairement les valeurs obtenues. Comme on peut le constater, les valeurs des contraintes maximales sont très proches les unes des autres, avec des pourcentages d'erreur négligeables. Ces pourcentages sont acceptables et confirment la validité du modèle numérique.

## V.4 Simulation et interprétation des résultats

Pour évaluer l'impact des variations des conditions opératoires et du type de fond de la colonne, nous avons effectué plusieurs simulations en modifiant les conditions opératoires (température, pression) ainsi que le type de fond. Cela nous a permis d'obtenir des résultats plus flexibles et ajustables.

### V.4.1 En absence de la température

#### V.4.1.1 La colonne à fond elliptique

Pression (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déplacement total (mm)
1.98	102.69	9.18
2.35	121.88	10.90
3.53	169.6	15.16

Tableau V 4-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en absence de température



V.4.1.1.1 contrainte maximale

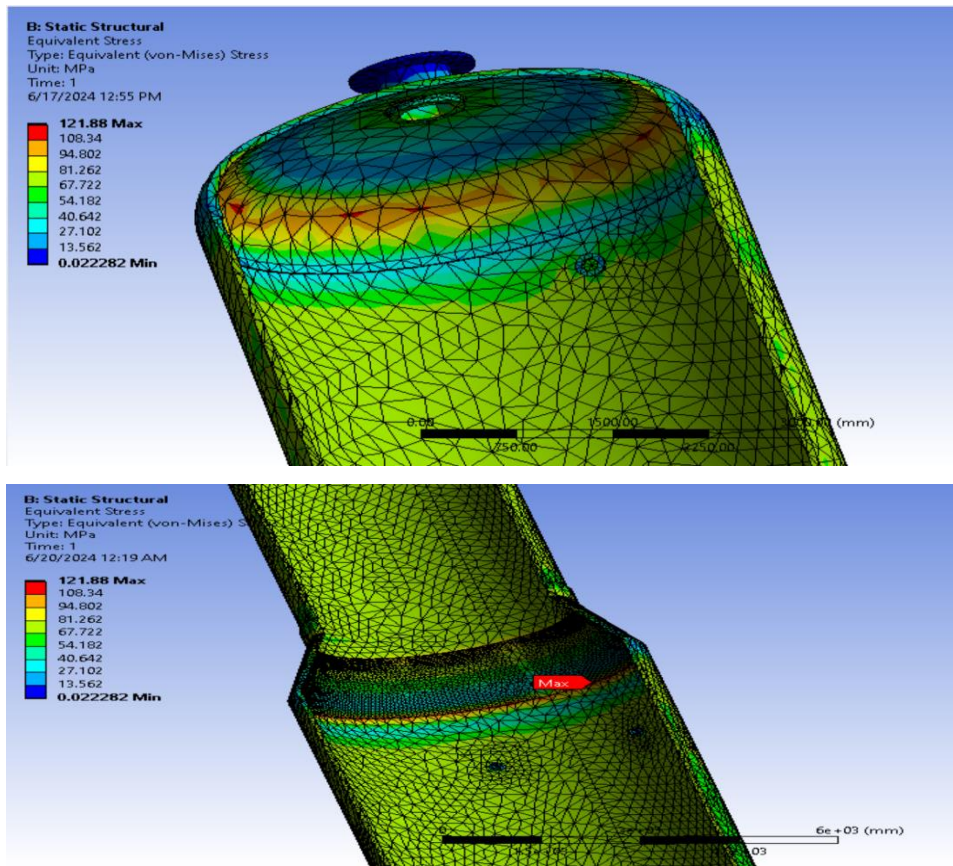


Figure V 14-Contrainte maximale à l’intérieur et l’extérieur de la colonne à fond elliptique en absence de la température

V.4.1.1.2 déplacement total maximal

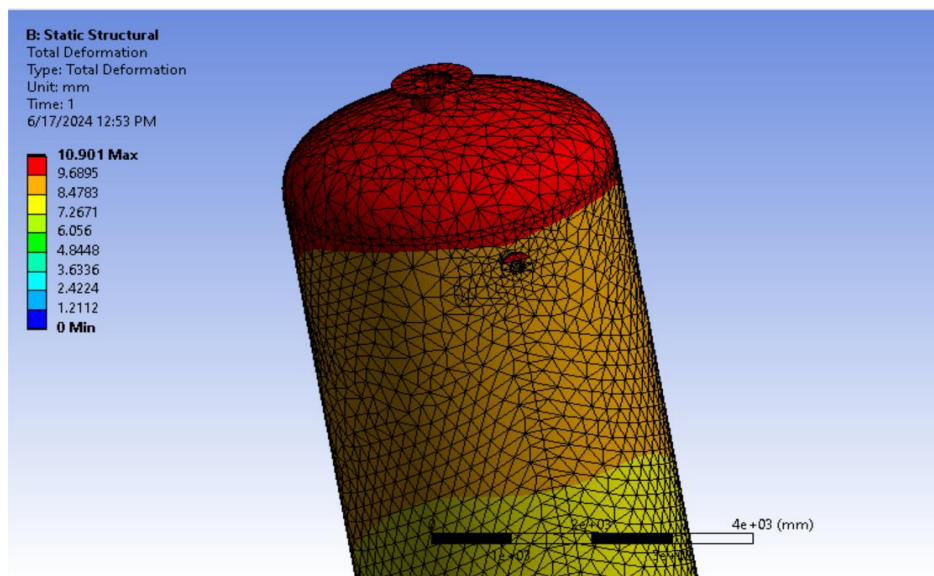


Figure V 15-déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en absence de la température

D'après le **tableau V 4** et les **figures V 14, V 15** on voit que la contrainte maximale et le déplacement total augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la pression.

La contrainte maximale est concentrée loin du joint de soudure proche de la virole conique avec une valeur de **121,88 MPa** lors de l'application d'une pression interne de **2,35 MPa**.

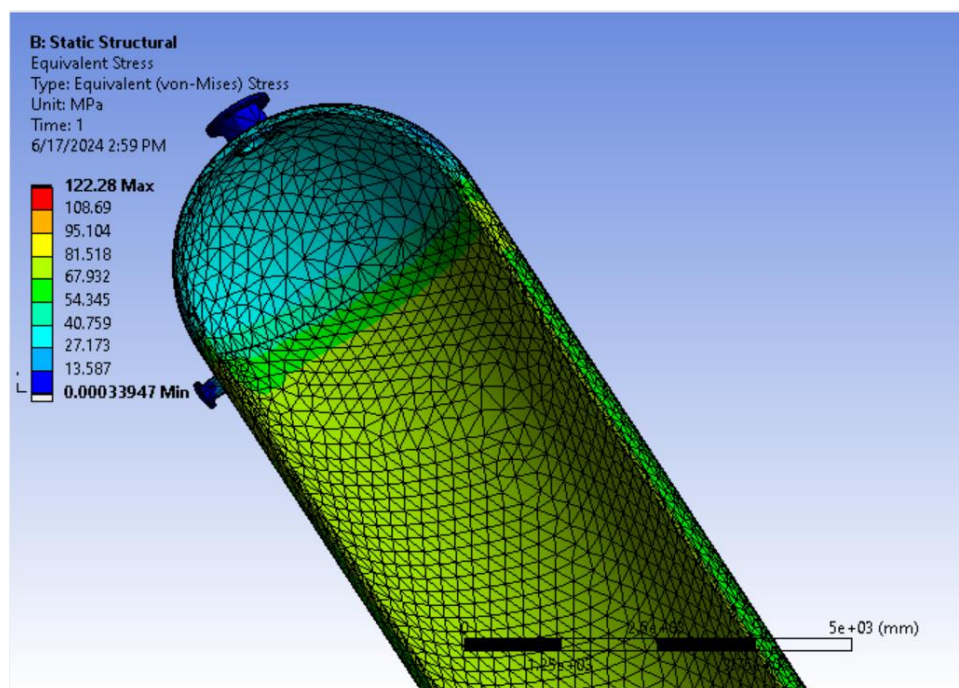
Aussi, il est clair que le déplacement total est concentré dans le fond supérieur de la colonne.

#### V.4.1.2 La colonne à fond hémisphérique

Tableau V 5-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température

Pression (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déplacement total (mm)
1.98	103.02	8.0022
2.35	122.28	9.4975
3.53	170.15	13.216

##### V.4.1.2.1 contrainte maximale



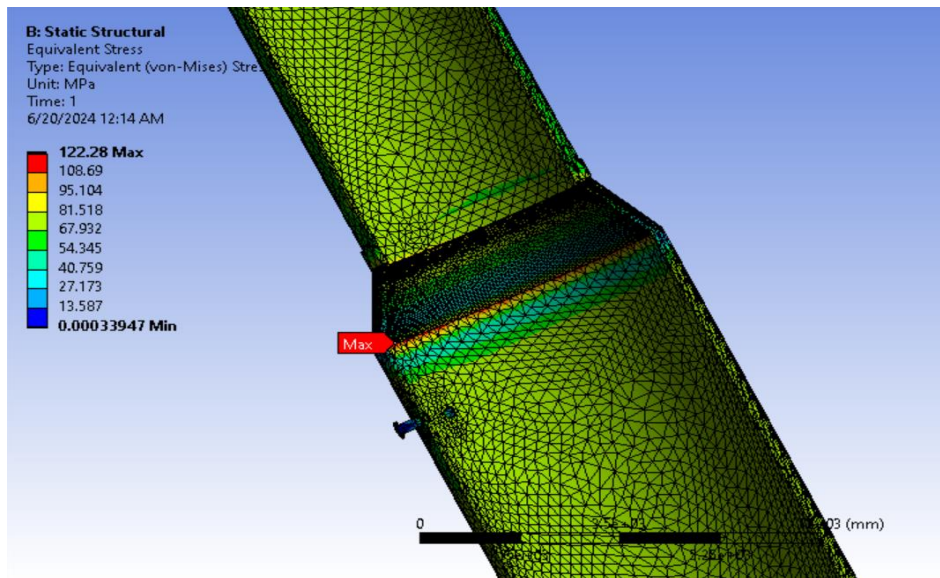


Figure V 16-Contrainte maximale à l’intérieur et l’extérieur de la colonne à fond hémisphérique en absence de la température

**V.4.1.2.2 déplacement total maximal**

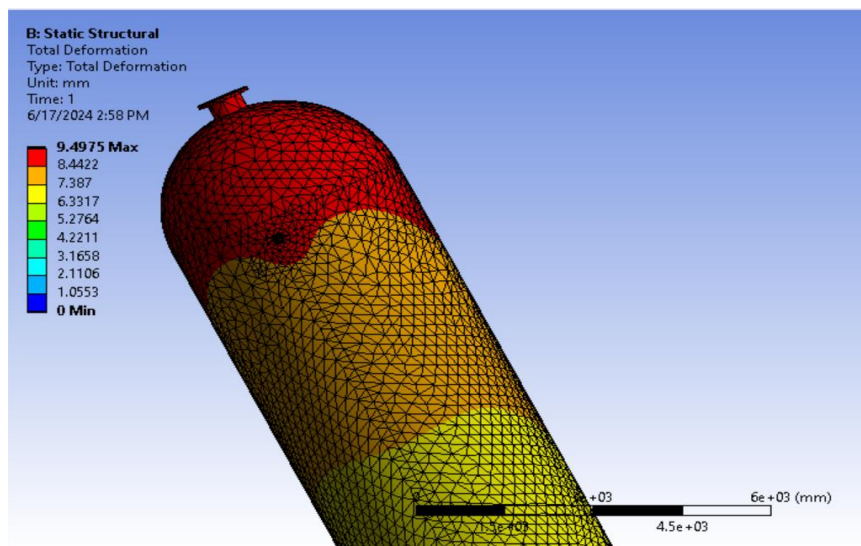


Figure V 17-déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en absence de la température

D'après le **tableau 5** et les **figures V 16 et V 17** on constate que les valeurs de la contrainte maximale et le déplacement total augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la pression.

La contrainte maximale est concentrée loin du joint de soudure sur la virole conique avec une valeur de **122,28 MPa** lorsqu'on a une pression interne de **2,35 MPa**.

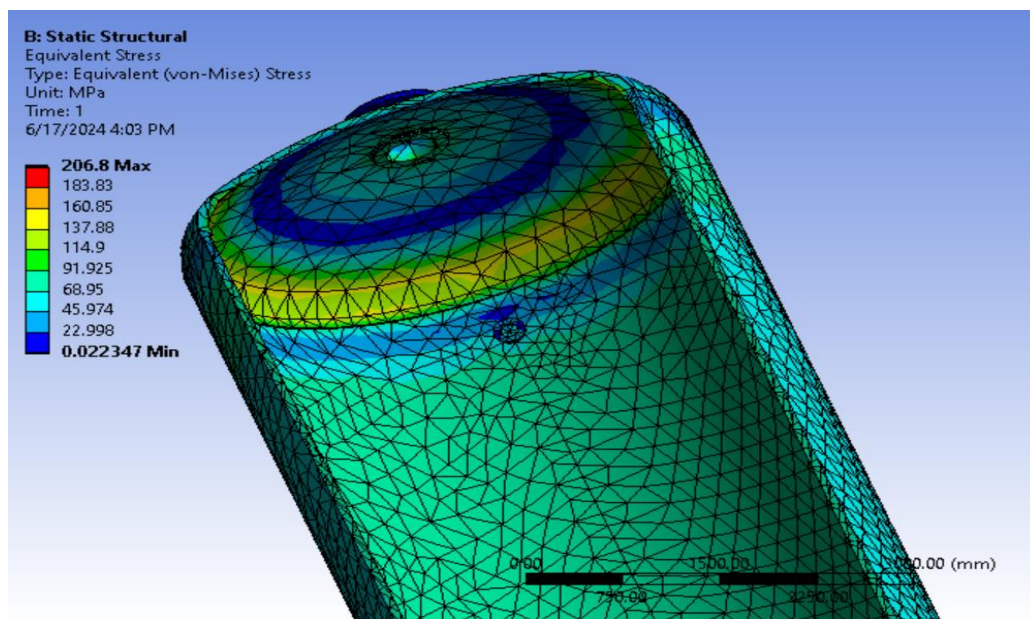
Il est clair que le déplacement total est concentré dans le fond supérieur et sur la partie supérieure de la virole supérieure.

#### V.4.1.3 La colonne à fond Tori-sphérique

Tableau V 6-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température

Pression (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déplacement total (mm)
1.98	174.24	8.81
2.35	206.8	10.8458
3.53	287.77	14.552

##### V.4.1.3.1 contrainte maximale



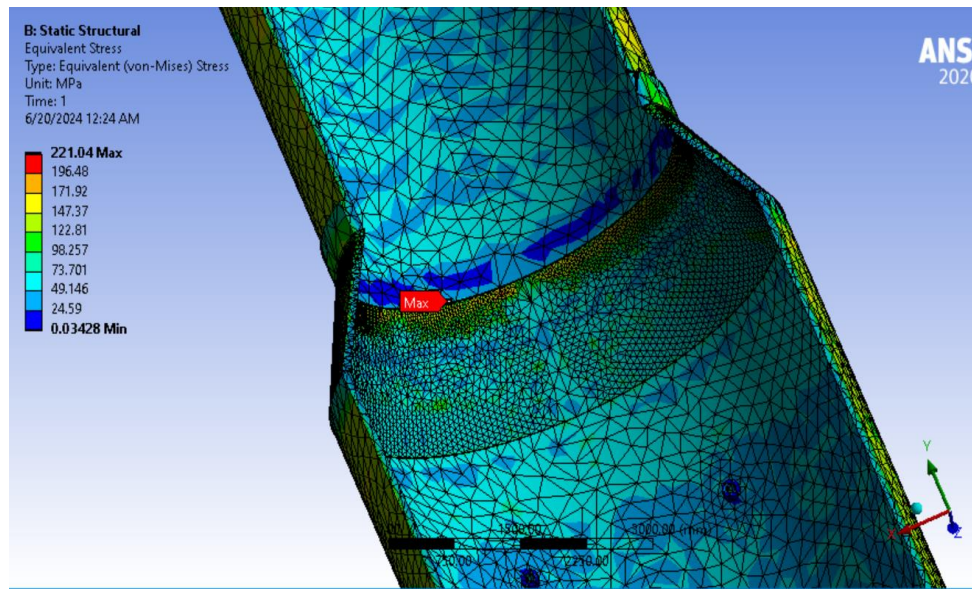


Figure V 18-Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température

#### V.4.1.3.2 déplacement total maximal

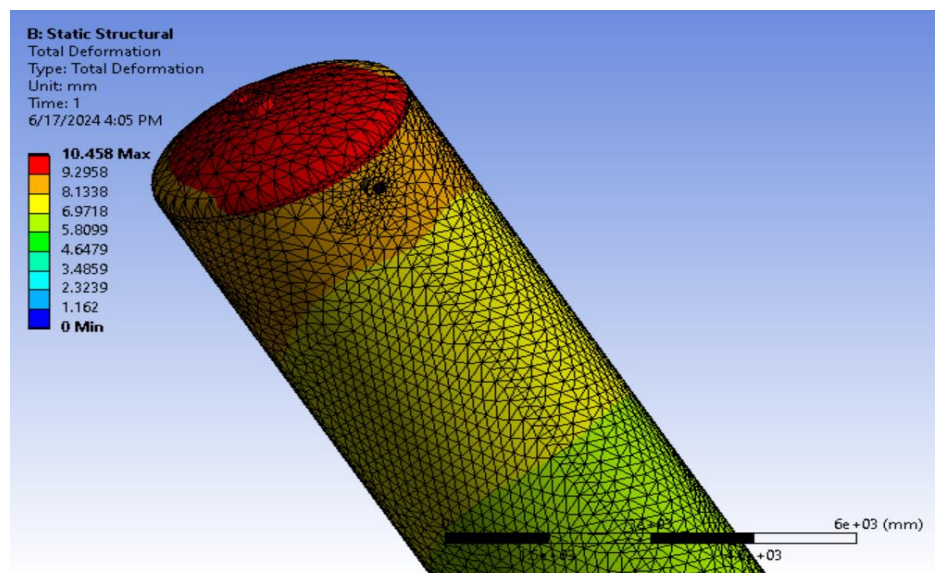


Figure V 19-déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température

D'après le **tableau V 6** et les **figures V 18 et V 19** on voit que la contrainte maximale et le déplacement total augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la pression.

La contrainte maximale est concentrée loin du joint de soudure proche de la virole conique avec une valeur de **221,04 MPa** lors de l'application d'une pression interne de **2,35 MPa**.

Aussi, il est clair que le déplacement total est concentré dans le fond supérieur de la colonne.

#### V.4.1.4 Interprétation

D'après les tableaux précédents on peut tracer un graphe pour comparer les résultats :

##### V.4.1.4.1 contrainte maximale

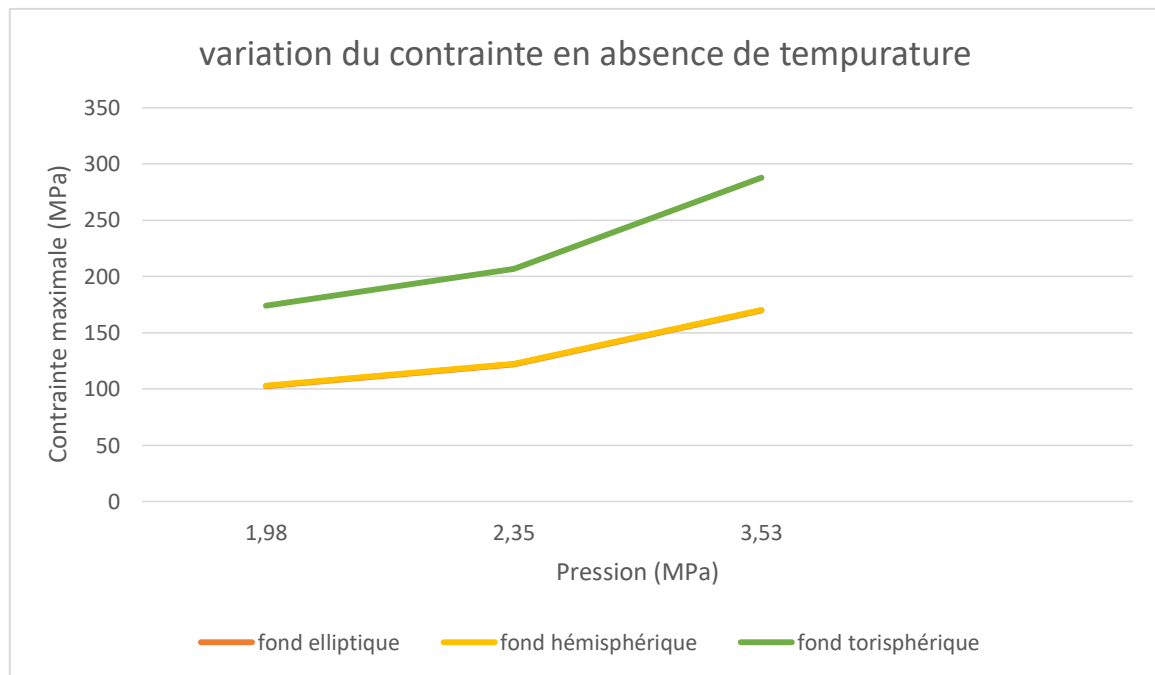


Figure V 20-Variation de contrainte en absence de température

Ce graphe représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la pression en absence de la température

Il est clair qu'avec l'augmentation de la pression la contrainte maximale augmente et devienne plus grande.

La courbe du fond Tori-sphérique présente des valeurs de contrainte maximale plus élevées que celles des autres fonds hémisphériques et elliptique.

Les courbes des fonds hémisphérique et elliptique représentent des valeurs similaire.

#### V.4.1.4.2 déplacement total maximal

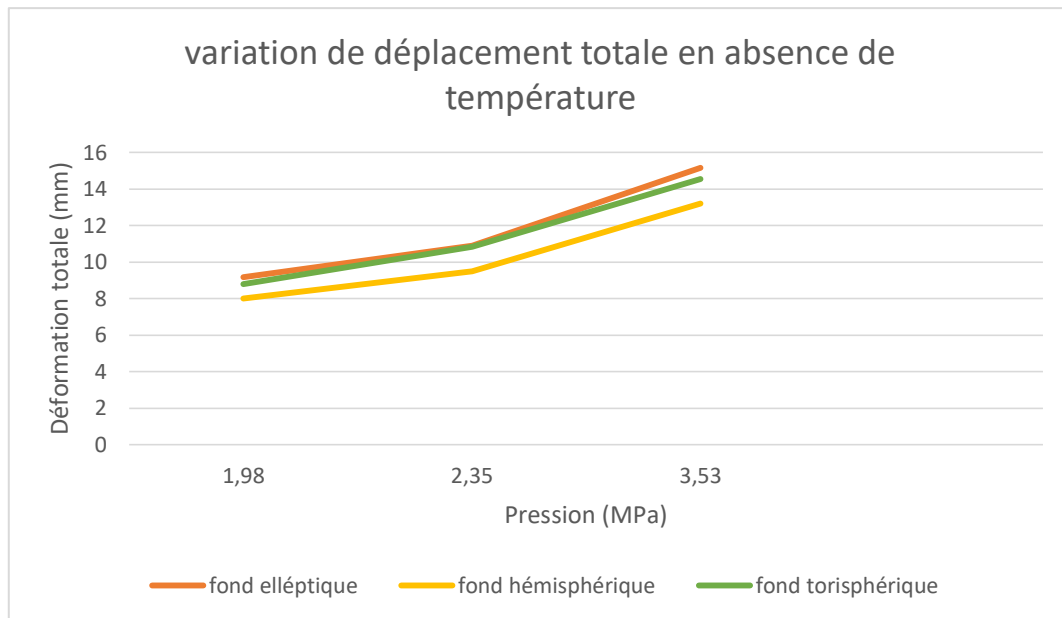


Figure V 21-Variation de déplacement totale en absence de température

Ce graphe représente la variation du déplacement total en fonction du changement de la pression en absence de la température

On constate que les trois courbes sont croissantes ce qui signifie que le déplacement totale augment avec l'augmentation de la pression.

La courbe du fond hémisphérique présente toujours des déplacements totaux plus faibles par rapport aux autres courbes, suivie par celle du fond elliptique, puis par celle du fond torisphérique. Cela indique que le fond hémisphérique offre une plus grande stabilité et une moindre déformation sous l'effet des variations de pression.

### V.4.2 En présence de la température

#### V.4.2.1 La colonne à fond elliptique

Tableau V 7-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en présence de température

Température (°c)	Pression (MPa)	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)
57	1.98	110.01	9.9203
	2.35	128.16	11.662
	3.53	173.77	15.998
70	1.98	124.9	10.378
	2.35	138.43	12.108
	3.53	182.64	16.427
80	1.98	146.39	10.753
	2.35	157.07	12.472
	3.53	190.76	16.772
90	1.98	169.11	11.148
	2.35	178.96	12.853
	3.53	205.86	17.131
100	1.98	192.62	11.559
	2.35	201.8	13.25
	3.53	227.04	17.503
111	1.98	221.52	12.071
	2.35	230.04	13.744
	3.53	253.6	17.964



V.4.2.1.1 La contrainte maximale

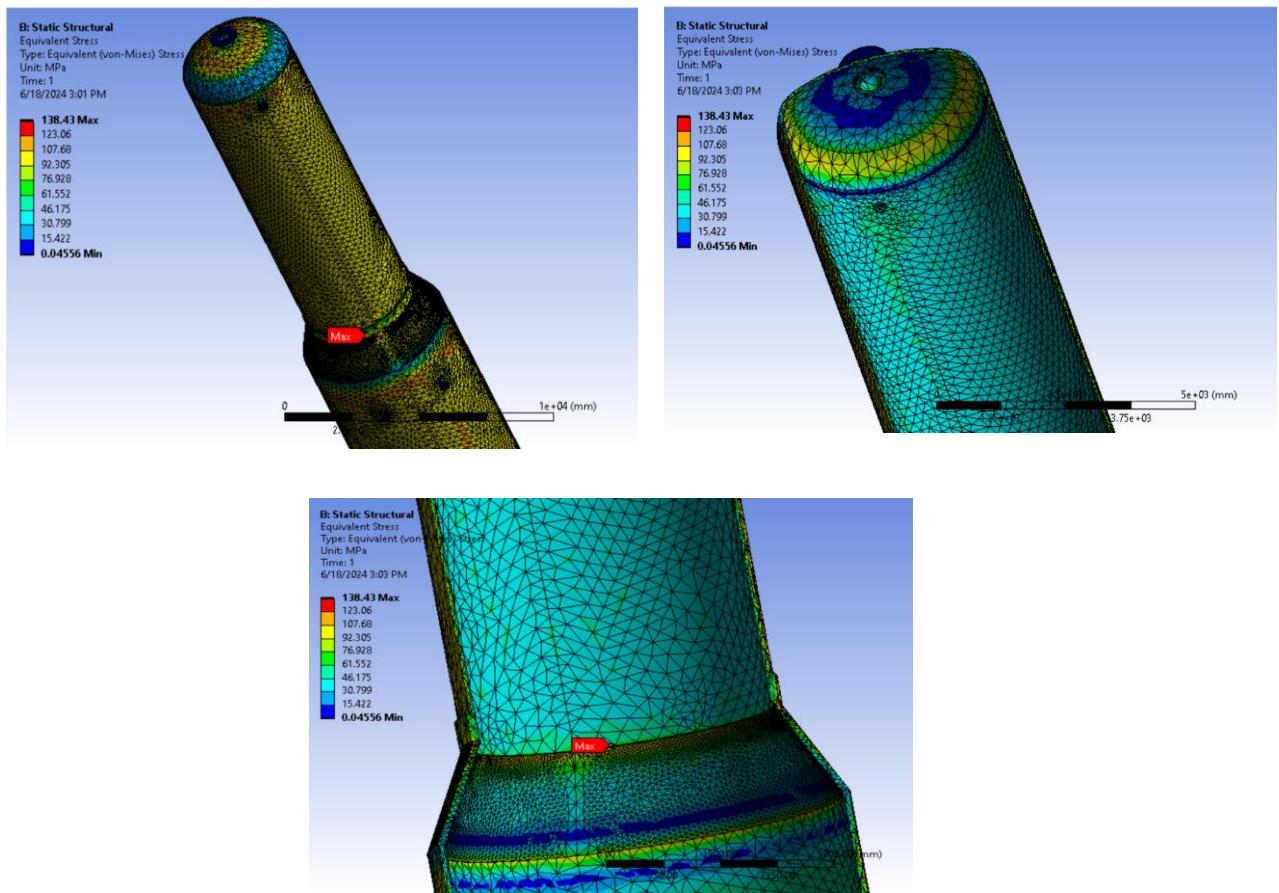


Figure V 22-Contrainte maximale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température

V.4.2.1.2 déplacement total maximal

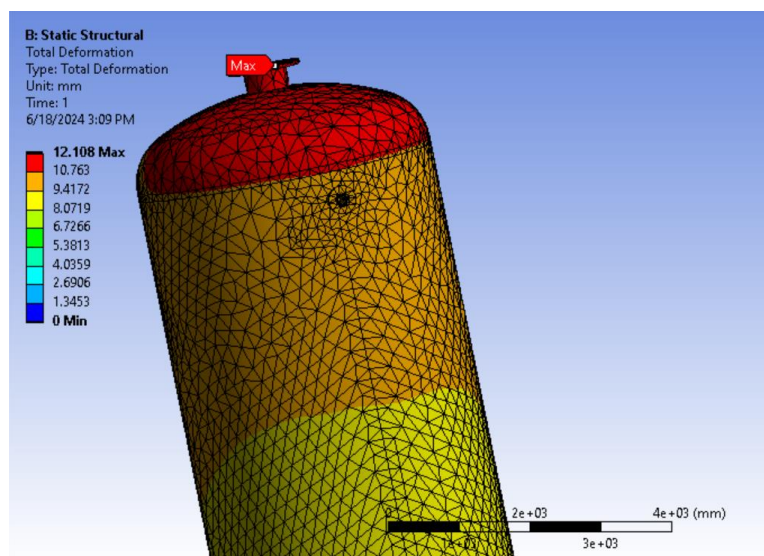


Figure V 23-Déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température

D'après le tableau V 7 et les figures V 22 et V 23, il est clair que les valeurs de la contrainte maximale augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la température tandis que les valeurs de déplacement total augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température.

La contrainte maximale est localisée loin du joint de soudure entre la virole conique et la virole supérieure

Le déplacement total est concentré sur la paroi du fond supérieur de la colonne.

#### V.4.2.2 colonnes à fond hémisphérique

Tableau V 8-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en présence de température

Température (°C)	Pression (MPa)	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)
57	1.98	109.24	8.4642
	2.35	127.24	9.9507
	3.53	172.52	13.655
70	1.98	124.75	8.8645
	2.34	137.52	10.336
	3.53	181.37	14.016
80	1.98	146.28	9.2054
	2.34	156.91	10.6661
	3.53	189.49	14.315
90	1.98	169.03	9.5717
	2.34	178.84	11.009
	3.53	205.62	14.633
100	1.98	192.57	9.9604
	2.34	201.71	11.378
	3.53	226.83	14.969
111	1.98	221.51	10.453
	2.34	229.99	11.846
	3.53	253.43	15.392

V.4.2.2.1 contrainte maximale

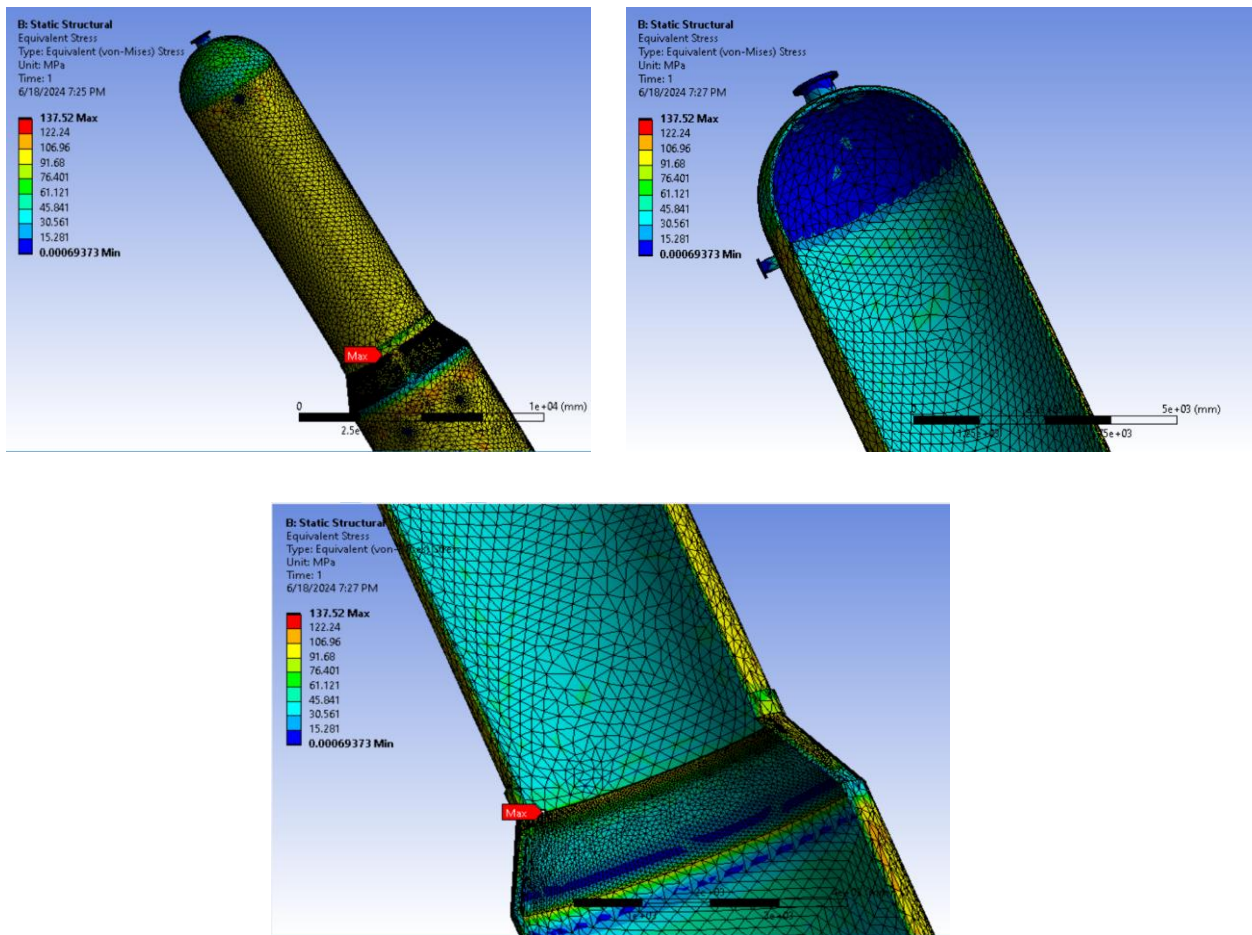


Figure V 24-Contrainte maximale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température

V.4.2.2.2 déplacement total maximal

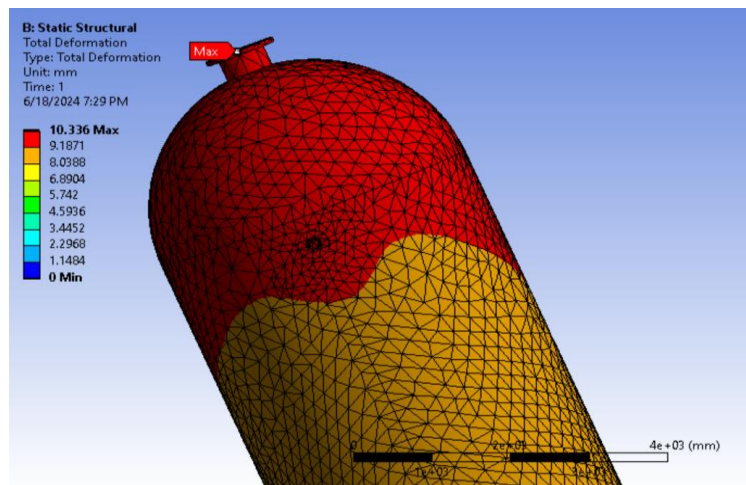


Figure V 25-Déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température

D'après le tableau V 8 et les figures V 24 et V 25 il est clair que les valeurs de la contrainte maximale augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la température tandis que les valeurs de déplacement total augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température.

La contrainte maximale est localisée loin du joint de soudure entre la virole conique et la virole supérieure.

Le déplacement total est concentré sur la paroi du fond supérieur de la colonne.

#### V.4.2.3 La colonne à fond Tori-sphérique

Tableau V 9-Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond Tori sphérique en présence de température

Température (°C)	Pression (MPa)	Contrainte (MPa)	Déplacement
57	1.98	165.22	9.471
	2.35	197.43	11.115
	3.53	277.76	15.199
70	1.98	161.01	10
	2.35	192.75	11.63
	3.53	272.38	15.698
80	1.98	158.91	10.425
	2.35	190.08	12.045
	3.53	268.88	16.096
90	1.98	168.61	10.866
	2.35	188.25	12.918
	3.53	265.97	16.507
100	1.98	192.13	11.322
	2.35	201.21	12.918
	3.53	263.65	16.929
111	1.98	221.04	11.886
	2.35	229.46	13.465
	3.53	262.06	17.448

V.4.2.3.1 La contrainte maximale

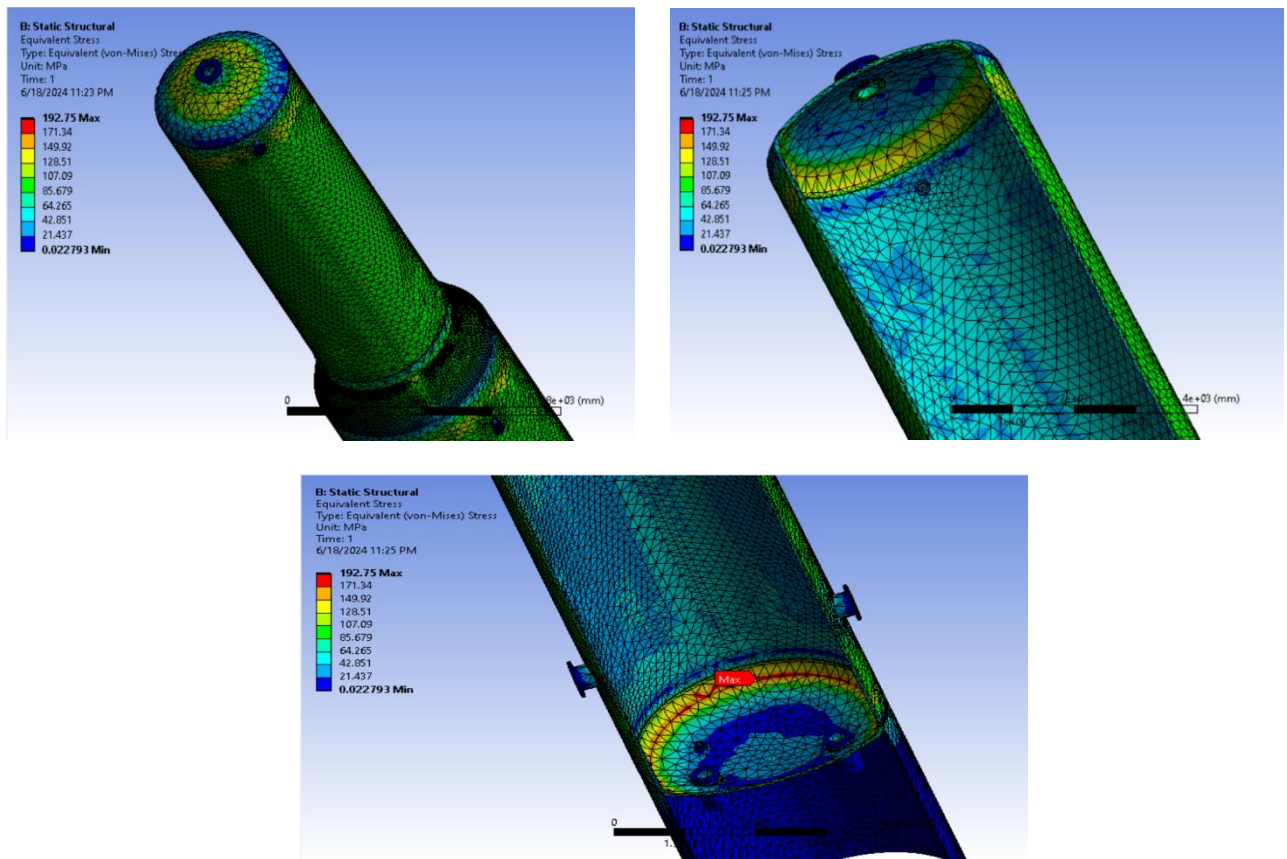


Figure V 26-Contrainte maximale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température

V.4.2.3.2 Le déplacement total maximal

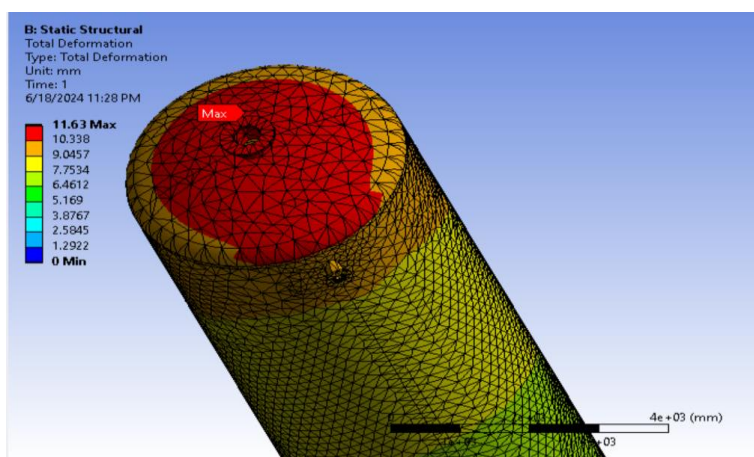


Figure V 27-Déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température

D'après le tableau V 9 et les figures V 26 et V 27 il est clair que les valeurs de la contrainte maximale augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la température tandis que les valeurs de déplacement total augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température.

La contrainte maximale est localisée sur le fond inférieur.

Le déplacement total est concentré sur la paroi du fond supérieur de la colonne.

#### V.4.2.4 Interprétation des résultats

##### V.4.2.4.1 La contrainte maximale

###### A. Pour une pression de 1,98 MPa

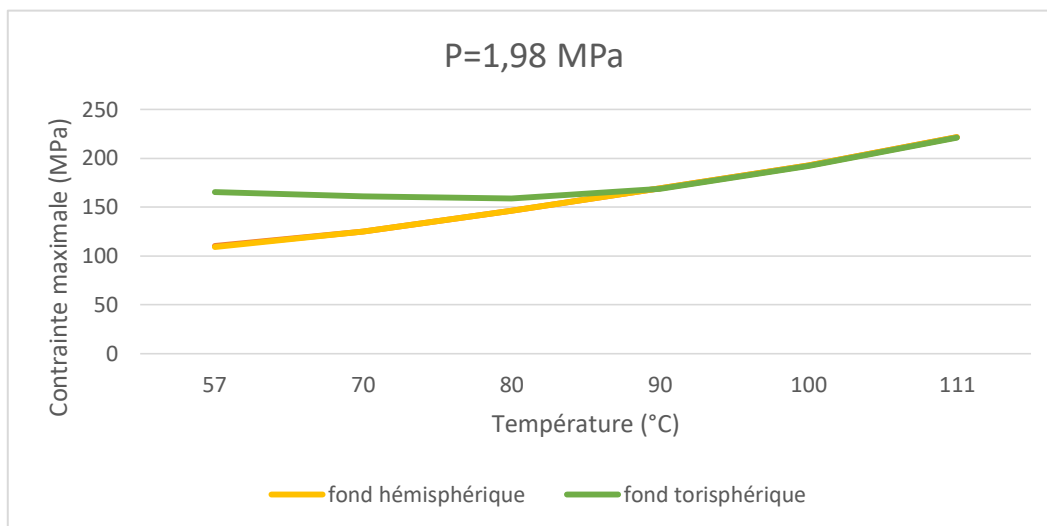


Figure V 28-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=1,98Mpa

Ce graphe représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante P=1,98 MPa

Dans l'intervalle [57°C - 90°C], les courbes du fond hémisphérique et du fond elliptique montrent des valeurs de contrainte maximale similaires en outre la courbe du fond Torisphérique représente une contrainte maximale plus élevée que celles des autres courbes de fonds.

Après la température 90°C, les trois courbes sont similaires.

### B. Pour une pression de 2,35 MPa

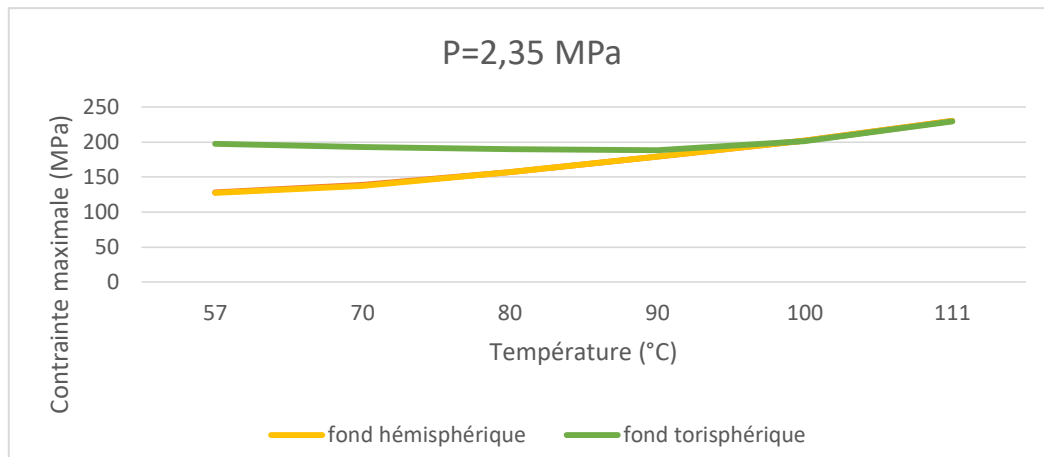


Figure V 29-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=2,35MPa

Ce graphe représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante P=2,35 MPa

Dans l'intervalle [57°C - 100°C], les courbes du fond hémisphérique et du fond elliptique montrent des valeurs de contrainte maximale similaires en outre la courbe du fond Torisphérique représente une contrainte maximale plus élevée que celles des autres courbes de fonds.

Après la température 100°C, les trois courbes sont similaires.

### A. Pour une pression de 3,53 MPa

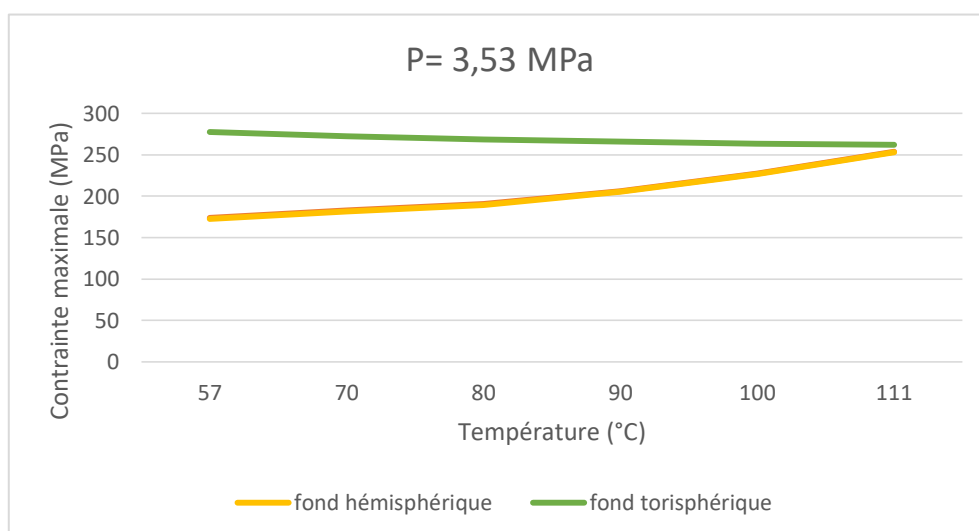


Figure V 30-Variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=3,53MPa

Ce graphe représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante  $P=3,53$  MPa

Les courbes du fond hémisphérique et du fond elliptique montrent des valeurs de contrainte maximale similaires en outre la courbe du fond Tori-sphérique représente une contrainte maximale plus élevée que celles des autres courbes de fonds.

#### V.4.2.4.2 Le déplacement total maximal

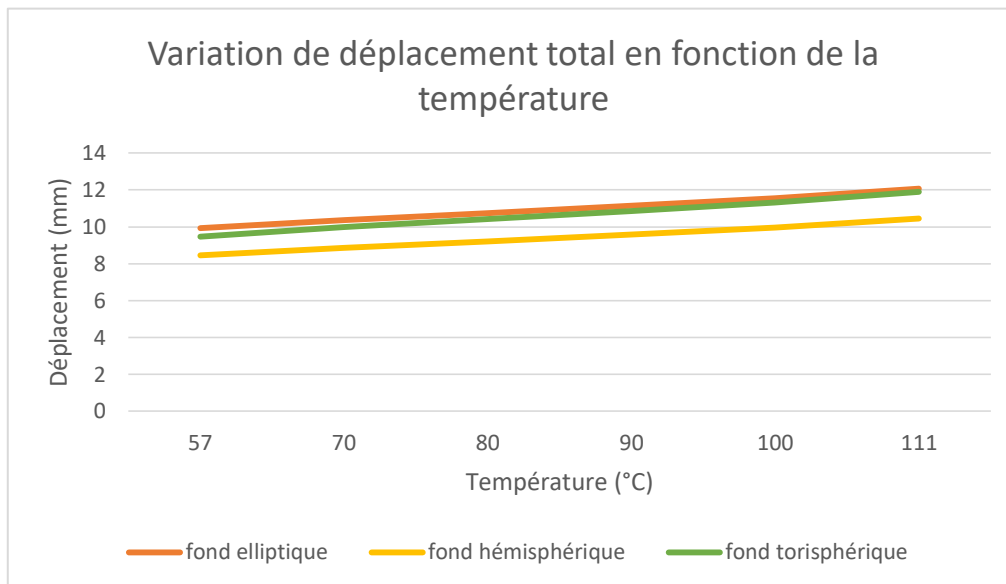


Figure V 31-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante  $P=1,98$ MPa

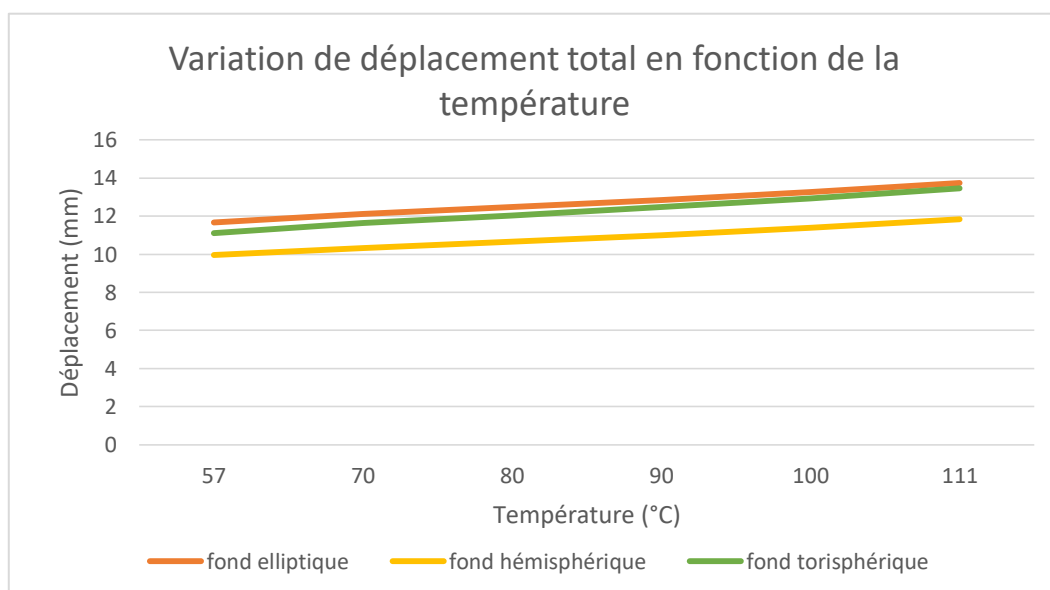


Figure V 32-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante  $P=2,35$ MPa



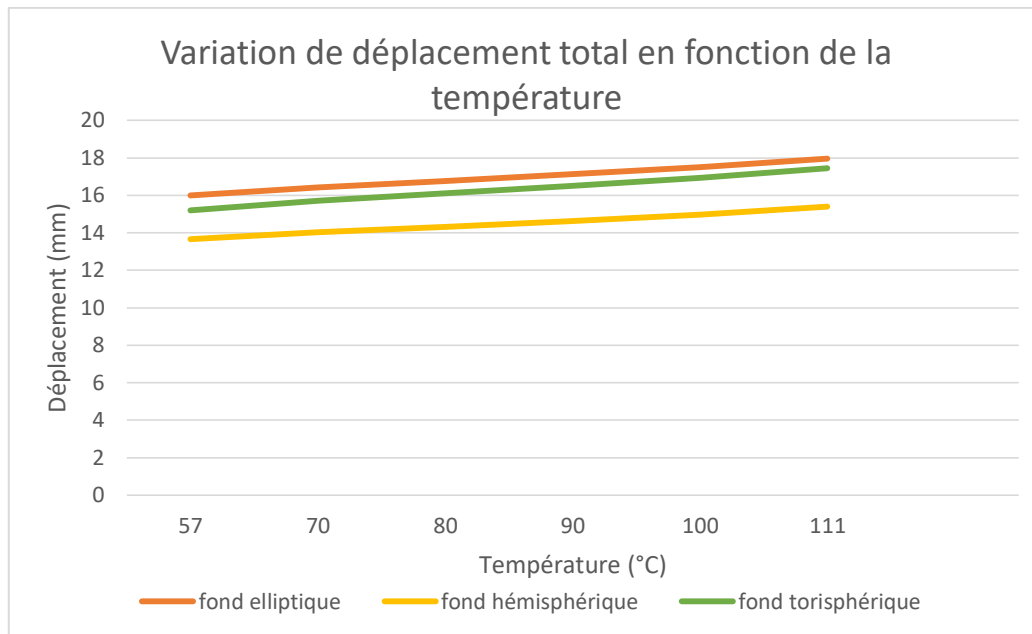


Figure V 33-Comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante  $P=3,53\text{MPa}$

Ces trois **graphes** représentent la variation du déplacement total en fonction de changement de la température dans des pressions constantes (1,98 ; 2,35 ; 3,53MPa) :

Dans les trois cas on peut observer que les trois courbes sont croissantes, le déplacement total augmente en fonction d'augmentation de la température.

On peut voir aussi que la courbe du fond hémisphérique présente un déplacement total le plus faible parmi les trois courbes, suivi du fond Tori-sphérique après le fond elliptique sphérique, ce qui indique que le fond hémisphérique offre une plus grande stabilité et une moindre déformation en réponse aux changements de température.

## Conclusion générale

Les réservoirs sous pression nécessitent un traitement spécial en raison du risque de déformations permanentes indésirables pouvant compromettre leur fonctionnement et leur durabilité. Ces réservoirs sont soumis à des normes strictes de conception, de fabrication et de contrôle qualité afin de garantir leur intégrité structurelle.

Le but de notre étude était d'analyser l'impact de la température, de la pression et du type de fond sur les performances de la colonne de fractionnement 32-V-7101 . Les résultats obtenus révèlent des observations significatives concernant cet effet :

- Le fond Tori-sphérique exhibe des contraintes notablement plus élevées que les fonds hémisphérique et elliptique. Ainsi, il est jugé peu favorable dans notre cas.
- Les études révèlent que les fonds hémisphérique et elliptique affichent généralement des performances comparables. Cependant, en l'absence de considération de la température, le fond elliptique semble offrir une réduction plus significative des contraintes maximales par rapport au fond hémisphérique.

En ce qui concerne les variations du déplacement total en fonction des changements de température et de pression, les observations suivantes peuvent être formulées :

- Le fond hémisphérique présente une stabilité légèrement supérieure, avec des déplacements totaux moins importants que ceux observés avec les fonds elliptique et Tori sphérique. Ainsi, le fond hémisphérique est considéré comme le choix optimal pour réduire les déplacements totaux ou les déformations indésirables associées aux variations de température et de pression.
- Les résultats obtenus révèlent que le complexe GP1Z a réussi de sélectionner le fond elliptique pour réduire les contraintes maximales.

**Recommandation :** Alors que le fond hémisphérique a démontré des performances comparables à celles du fond elliptique en termes de résistance aux contraintes maximales, il s'est avéré préférable pour réduire les déplacements totaux ou les déformations indésirables. Ces résultats fournissent des indications importantes en faveur de la recommandation d'un fond hémisphérique pour la colonne de fractionnement 32-V-7101 , en tant que deuxième choix pour optimiser son fonctionnement et sa durabilité.

[1] Bhagat Meghraj Vitthal, “Axisymmetric Stress Analysis of internally Pressurized Rotating Cylinder using Finite Element Method” National Institute of Technology Rourkela 2010

[2] V. Bhandari, «Design of Machine Elements,» *Tata Mc Graw Hill Publication*, 2012.

[3] TapanMajumder, “Optimum Design of Three Layer Compound Cylinder”IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN : 2278- 1684, p-ISSN : 2320-334X, Volume 11, Issue 3 Ver. III (May- Jun. 2014), PP 33-41 [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org)

[4] Chandrakant R Kini, “Modelling and Equivalent Stress Analysis of Flat Dish End Pressure Vessel”Modelling and Equivalent Stress Analysis of Flat Dish End Pressure Vessel (INPRESSCO), vol.5, no.5, (Oct 2015)

[5] J. F. D. S. J. Pratama, «A low cost validation method of finite element analysis on a thin walled vertical pressure vessels,» *Journal of Physics: Conference Series*, 1444, 2020.

[6] «pressure vessel article,» *QS Directory*, 2022.

[7] <https://safetyculture.com/fr/themes/reservoir-sous-pression/>

[8] <https://www.oilgaspedia.com/what-is-a-pressure-vessel/>

[9] [http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=2210#Types de fonds](http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=2210#Types_de_fonds)

[10] <https://fr.kindle-tech.com/faqs/why-is-distillation-important-in-industry>

[11] <https://pediaa.com/difference-between-fractional-distillation-and-simple-distillation/>

[12] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/raffinage-petrolier>

[13] <https://www.labbe-france.fr/colonne-de-distillation/>

[14]<https://insights.globalspec.com/article/19223/understanding-stresses-and-failure-in-pressure-vessels>

[15] <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>

[16] SolidWorks description Guide <https://www.solidworks.com/>

[17] Fundamental FEA Concepts and ApplicationsA Guidebook for the Use and Applicability of Workbench Simulation Tools, ANSYS, Inc.

---

## Annexe

<b>DRAWINGS REVIEW</b> does not relieve Supplier of his responsibility to meet purchase order conditions relating to duty specifications, materials, design, construction and delivery requirements.		
<input checked="" type="checkbox"/> 1. Approved <input type="checkbox"/> 2. Approved with comment(s) – Make changes and submit final drawing. <input type="checkbox"/> 3. Not approved. Correct and resubmit.		
Job No.	5011-117	
Equipment No.	32-V-7101/8101/9101	
IHI Dwg. No.	V1102-1011_01	Rev. 3 A
<b>IHI</b>	T. Koda	—
	Reviewed	Checked
	Section : Engineering Dept. Engineering & Plants Operations	
		Approved Date 07/11/27

DONNÉES DE CALCUL (DESIGN DATA)		
CODE (DESIGN CODE)	ASME SEC.VIII DIV.1 2004 EDITION AND UP TO 2006 ADDENDA	
ESTAMPILLE (CODE STAMP REQ'D)	NON (NO)	
FLUIDE (FLUID)	C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub> GPL (LPG)	
CAPACITÉ (CAPACITY)	868000(868)	Liter(m <sup>3</sup> )
PRESSION DE CALCUL (DESIGN PRESSURE)	23.5(2.35) / F.V.	Bar(Mpa)
PRESSION DE SERVICE (OPE. PRESSURE)	TÊTE(TOP) 19.8(1.98) / FOND(BTM) 20.1(2.01)	Bar(Mpa)
TEMPÉRATURE DE CALCUL (DESIGN TEMPERATURE)	135 / 135	°C
TEMPÉRATURE DE SERVICE (OPE. TEMPERATURE)	TOP 57 / BTM 111	°C
MIN. MÉTAL TEMPÉRATURE DE CALCUL (MIN. DESIGN METAL TEMP.)	0	°C
SURÉPAISSEUR DE CORROSION (CORR. ALLOW.)	ENVELOPPE, FOND (SHELL, HEAD)	3.0 mm
	INTÉRIEUR (INTERNAL)	PAR SPEC. DE TRAVAIL (BY JOB SPEC.) mm
TRAITEMENT THERMIQUE APRES SOUDAGE (P.W.H.T.)	OUI (YES)	
EPREUVE HYDROSTATIQUE (SHOP HYDRO. TEST.)	PRESSION (PRESS.)	35.3(3.53) Bar(Mpa)
	TEMPERATURE (TEMP.)	MIN. (MIN.) 5 °C
	POSITION (POSITION)	HORIZONTALE (HORIZONTAL)
RT	(RT)	PLEIN (FULL)
MT, PT	(MT, PT)	NOTES 3. (NOTES 3.)
CHOC	(IMPACT TEST)	OUI (YES)
DURETÉ	(HARDNESS TEST)	OUI (YES)
ISOLEMENT	(INSULATION)	75 / 100 (PAR LES AUTRES) ((BY OTHERS)) mm
IGNIFUGATION	(FIRE PROOF)	50 (PAR LES AUTRES) ((BY OTHERS)) mm
PEINTURE	(PAINTING)	OUI (PAR SPEC. DE TRAVAIL) (YES) ((BY JOB SPEC.))
POIDS D'APPAREIL (WEIGHT)	VIDE (EMPTY)	383'000 kg
	REPLI'D'EAU (W.FULL OF WATER)	1251'000 kg



