

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

Présenté par :

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Mécanique des unités Pétrochimiques

Thème

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

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Examineur			
Examineur			
Encadreur	Mr.Farroudji.H	MC/B	UMBB

Boumerdes 2023

Remerciement

Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Nous tenons à exprimer tout notre respect et reconnaissance à notre encadreur Mr. Hicham FERROUDJI pour ses efforts, ses conseils, ses remarques et pour le temps qu'il nous a accordé le long de cette période.

Nous tenons ainsi à remercier chaleureusement les ingénieurs du complexe GL2Z, Sonatrach, pour leur soutien, leur aide, leur partage et explication, et leur présence tout le temps malgré leurs obligations professionnelles.

Nos vifs remerciements vont aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier tous nos enseignants du département Transport et équipements des hydrocarbures qui ont fait de leur mieux pour nous assurer une bonne formation en ingénierie pétrolière.

Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements à nos familles et nos amis qui par leurs encouragements, nous avons pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Aymen et Amine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A mes chers parents pour leur soutien, leur patience,
leur encouragement durant mon parcours scolaire*

A mes frères Raouf, Okba et Fouzi

A mes sœurs

A mes neveux et toute ma famille.

A mes amis et mes camarades

Aymen

Je dédie ce modeste travail

*A mes chers parents pour leur soutien, leur patience,
leur encouragement durant mon parcours scolaire*

A mes frères Walid et Sohaib

A toute ma famille.

A tous mes amis mes frères d'une autre mère

A mes camarades

Amine

Introduction générale	1
État de l'art :	2
Objectif de ce travail :	3
Organisation de ce travail	4
CHAPITRE I : L'ETUDE THEORIQUE.....	5
I.1 Introduction :	5
I.2 Classification des réservoirs sous pression :	6
I.2.1 Selon l'objectif :	6
I.2.2 Selon la géométrie :	7
I.3 Les composants d'un réservoir sous pression :	7
I.3.1 Les fonds :	8
I.3.2 La virole :	9
I.3.3 Les tubulures :	9
I.4 La distillation :	9
I.4.1 Définition :	9
I.4.2 Le principe de la distillation :	10
I.4.3 Les types de distillation :	10
I.4.4 La colonne de distillation :	11
I.5.1 stress membranaire :	13
I.5.2 Analyse des contraintes dans les appareils sous pression selon le code ASME :	15
I.6 Présentation du code ASME :	15
I.6.1 codes ASME utilisés couramment pour étudier les réservoirs sous pression :	16
I.7 Présentation des logiciels de simulation :	16
I.7.1 Le logiciel ANSYS :	16
I.7.2 logiciel SolidWorks :	19
I.8 Méthode numérique « méthode des éléments finis »	21
I.8.1 Définition :	21
I.8.2 Analyse par éléments finis :	23
I.9 Intelligence artificielle:.....	25

Sommaire

I.9.1 Définition :	25
I.9.2 Apprentissage Automatique (Machine Learning) :	26
I.9.3 Réseaux De Neurones Artificiels (Artificial Neural Network) :	28
I.9.4 l'hyperparamètre RNA (ANN Hyperparameter) :	30
Chapitre 02 : calcul de vérification de stabilité de la colonne	30
II.1 Introduction :	30
II.2 Définitions:	30
II.2.1 Les contraintes agissant sur la colonne:	30
II.2.2 La température de design :	31
II.2.3 La pression maximale admissible :	31
II.2.4 L'épaisseur minimale requis :	31
II.3 L'essai hydrostatique :	32
II.4 La colonne de distillation nouvelle 501E de complexe GNL2/Z :	32
II.4.1 Définition :	32
II.4.2 Dimensionnement et conditions de fonction de colonne de distillation 501E :	33
II.5 Calcul des contraintes :	34
II.5.1 La contrainte admissible :	34
II.5.2 Calcul des contraintes membranaires :	34
II.6 Calcul de l'épaisseur minimale requis :	36
II.6.1 La virole	36
II.6.2 Le fond supérieur :	37
II.6.3 Le fond inférieur :	37
II.7 La pression de travail maximale admissible :	37
II.7.1 La virole :	37
II.7.2 Le fond supérieur :	38
II.7.3 Le fond inférieur :	38
II.8 Calcul de moment de vent :	39
II.8.1 Calcul de la poussée du vent :	39
II.8.2 Calcul des moments fléchissant :	42
II.9 L'essai hydrostatique :	43
II.9.1 La résistance du fond inférieur lors de l'essai hydrostatique :	43
II.9.2 Calcul de pression hydrostatique :	43
II.9.3 La contrainte maximale au fond inférieur :	44

Sommaire

Chapitre III : Modélisation numérique	45
III.1 Introduction : 45	
III.2 Modélisation par SolidWorks :	45
III.3 Modélisation de la colonne à fond elliptique (nouvelle 501E) :.....	48
III.3.1 Modélisations des fonds de la colonne :	48
III.3.2 Modélisation des viroles de la colonne :	49
III.3.3 Assemblage : 50	
III.4 Modélisation de la colonne avec différents fonds:	50
III.4.1 Modélisation de la colonne à fond hémisphérique :	50
III.4.2 Modélisation de la colonne à fond Tori-sphérique :	51
III.5 Les étapes de la simulation:	52
III.5.1 La première étape:	52
III.5.2 La deuxième étape:	53
III.5.3 La dernière étape :.....	54
III.5.4 Schématisation des étapes de simulation par le logiciel ANSYS 18.0 :.....	55
III.6 Modèle d'intelligence artificiel (ANN):	55
III.6.1 Présentation du code:	55
Chapitre IV : Résultats et interprétations.....	58
IV.1 Introduction: 58	
IV.2 Le choix du maillage:	58
IV.3 Evaluation de la contrainte circonférentielle par simulation :.....	60
IV.3.1 Simulation des contraintes agissants sur les parois des différentes parties de la colonne ainsi que l'essai hydrostatique :	61
IV.3.2 Interprétation: 64	
IV.3.3 Validation des résultats :.....	64
IV.4 Simulation et interprétation des résultats :	66
IV.4.1 En absence de la température :	66
IV.4.2 En présence de la température :	71
IV.5 Interprétation des résultats de L'intelligence Artificielle :	80
IV.5.1 Validation de la précision de code:.....	80
IV.5.2 Présentation Des résultats de code:	82

Liste des figures

Figure II- 1 classification des réservoirs sous pression [9].....	6
Figure II- 2 les composants d'un réservoir sous pression [10].....	8
Figure II- 3 Les différents types des fonds [11].....	9
Figure II- 4 Les différentes contraintes appliquées sur la paroi de l'équipement [14].....	14
Figure II- 5 La contrainte longitudinale [14].....	14
Figure II- 7 La contrainte circonférentielle [14].....	14
Figure II- 6 la contrainte radiale [14].....	14
Figure II- 8 Les étapes de l'analyse par éléments finis [19].....	23
Figure II- 9 Les types des éléments utilisés par le logiciel ANSYS [19].....	24
figure II- 10 Représentation de l'intelligence artificielle et ses sous-domaines [30].....	26
Figure II- 11 les sous-domaines de machine Learning[30].....	27
Figure II- 12 Diagramme d'Artificial Neural Network [31].....	29
Figure II- 13 Diagramme de feedback et feed-forward ANN [32].....	30
Figure III- 1 Les fonctions et les outils utilisés de SolidWorks.....	46
Figure III- 2 La création du dessin de la virole par les différents outils de SolidWorks.....	46
Figure III- 3 La création de la tubulure par la fonction d'enlève de matière avec rotation.....	47
Figure III- 4 La forme finale de la virole.....	47
Figure III- 5 Dessin technique 2D du fond elliptique.....	48
Figure III- 6 Modélisations du fond inférieur par SolidWorks.....	49
Figure III- 7 Modélisation du fond supérieur par SolidWorks.....	49
Figure III- 8 Modélisation de la virole supérieure et inférieur par SolidWorks.....	49
Figure III- 9 Modélisation de la virole conique par SolidWorks.....	49
Figure III- 10 L'assemblage de la colonne à fond elliptique 1.....	50
Figure III- 11 L'assemblage de la colonne à fond elliptique 2.....	50
Figure III- 12 Dessin technique 2D du fond hémisphérique.....	51
Figure III- 13 Modélisation du fond hémisphérique par SolidWorks.....	51
Figure III- 14L'assemblage de la colonne à fond hémisphérique.....	51
Figure III- 15 Dessin technique 2D du fond Tori sphérique.....	51
Figure III- 16 Modélisation du fond Tori sphérique par SolidWorks.....	52
Figure III- 17 L'assemblage de la colonne à fond Tori sphérique.....	52

Liste des figures

Figure III- 18 L'onglet d'ouverture des programmes static structural et transiant thermal.....	53
Figure III- 19 Le choix du matériau dans ANSYS Workbench	53
Figure III- 20 L'ajout des conditions : support fixe- pression-température.....	54
Figure III- 21 Les résultats de la simulation	54
Figure III- 22 Un schéma qui montre les étapes de simulation par le logiciel ANSYS 18.0 ...	55
Figure III- 23 couche de bibliothèques utilisées.....	55
Figure III- 24 couches de traitement des données	56
Figure III- 25 couches d'apprentissage du model ANN avec ses hyperparamètres et prédiction des valeurs cibles pour les données de test et d'apprentissage	56
Figure III- 26 couche de prédiction des valeurs cibles pour des Nouvelles données	57
Figure IV- 1 graphe du choix optimale de maillage	59
Figure IV- 2 Propriétés de maillage.....	60
Figure IV- 3 Maillage de la colonne à fond elliptique.....	60
Figure IV- 4 maillage du fond elliptique	60
Figure IV- 5 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond supérieur	61
Figure IV- 6 contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole supérieure.....	61
Figure IV- 7 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole conique.....	62
Figure IV- 8 contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole inférieure.....	62
Figure IV- 9 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond inférieur	62
Figure IV- 12 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne	63
Figure IV- 10 pression hydrostatique appliquée sur l'intérieur de la colonne	63
Figure IV- 11 Conditions de l'essai hydrostatique.....	63
Figure IV- 13 Diagramme de comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations	65
Figure IV- 14 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond elliptique en absence de la température.....	67
Figure IV- 15 déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en absence de la température	67
Figure IV- 16 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond hémisphérique en absence de la température	68
Figure IV- 17 déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en absence de la température	68

Liste des figures

Figure IV- 18 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température	69
Figure IV- 19 déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température	69
Figure IV- 20 variation de contrainte en absence de température	70
Figure IV- 21 variation de déplacement totale en absence de température	71
Figure IV- 22 contrainte maximale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température	72
Figure IV- 23 déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température	72
Figure IV- 24 contrainte maximale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température	73
Figure IV- 25 déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température	73
Figure IV- 26 contrainte maximale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température	74
Figure IV- 27 déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température	75
Figure IV- 28 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à $P=4,96\text{MPa}$	75
Figure IV- 29 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à $P=3,8\text{MPa}$	76
Figure IV- 30 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à $P=2,64\text{MPa}$	77
Figure IV- 31 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=4,96\text{MPa}$	78
Figure IV- 32 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=3,8\text{MPa}$	79
Figure IV- 33 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=2,64\text{MPa}$	79
Figure IV- 34 le résultat de la couche R-squared	80
Figure IV- 35 représentation graphique de la précision du code (données de test et d'entraînement)	80
Figure IV- 36 représentation graphique de la précision du code (données de test).....	81

Liste des figures

Figure IV- 37 résultats de la couche des nouvelles données	82
Figure IV- 38 représentation graphique des résultats des nouvelles données	83

Liste des tableaux

Tableau II- 1 Dimensions et conditions de fonctionnement de la colonne 501E	33
Tableau II- 2 Les propriétés du matériau SA 240-304.....	34
Tableau IV- 1 le choix optimal de maillage.....	58
Tableau IV- 2 les propriétés de maillage	59
Tableau IV- 3 les résultats de la simulation.....	64
Tableau IV- 4 comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations	65
Tableau IV- 5 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en absence de température.....	66
Tableau IV- 6 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température	67
Tableau IV- 7 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en absence de température	68
Tableau IV- 8 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond elliptique en présence de température	71
Tableau IV- 9 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en présence de température	73
Tableau IV- 10 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond Tori sphérique en présence de température	74

Nomenclature

ASME	American Society of Mechanical Engineers
[B]	Matrice des dérivées partielles des coefficients de pondération
BPVC	Boiler and pressure vessel code
D	Diamètre de la colonne
[D]	matrice d'élasticité
E	Module de Young MPA
MEF	Méthode des éléments finis
g	l'accélération de pesanteur = 9.81 m/s ²
h	Hauteur des fonds
[K]	la matrice de rigidité
L	Longueur de la colonne
N	fonctions de formes
n	Facteur de sécurité
P_c	Pression intérieur de constricteur
P_{essai}	Pression d'essai hydrostatique
P_{st}	Pression de l'eau contenue dans la colonne.
P_s	Pression de service
q_e	vecteur formé de l'ensemble des déplacements nodaux
R	Rayon de la colonne
t	Epaisseur
t_c	Epaisseur de constricteur
T_c	Température de calcul
ρ	Densité de liquide utilisé dans le test hydrostatique
σ_L	contrainte longitudinale
σ_H	contrainte circonférentielle
σ_r	contrainte radiale
σ_a	Contrainte admissible
σ_e^{tc}	Limite élastique dans la température de calcul

Nomenclature

σ_{fond}	Contrainte dans le fond inférieur
ε	Déformation
MAWP	la pression maximale admissible
MDMT	Température maximale de calcul
K_i	Coefficient aérodynamique
R_e	Nombre de Reynold
v_{air}	La vitesse du vent (air),
θ_i	Coefficient de surcharge qui dépend de H
β_i	Coefficient d'augmentation de la poussée spécifique
mi	Coefficient de pulsation du vent
ε	Coefficient de dynamique
Q_{max}	Charge maximal
I	Moment d'inertie
S_i	La surface face au vent
P_i	L'effort du vent
X_i	Distance de chaque section

Résumé - L'objectif de cette étude est d'analyser la résistance au stress d'une colonne de distillation face aux variations de pression et de température, en tenant compte de différents types de fonds. De plus, la résistance de la colonne au test hydrostatique, conformément au code ASME, est examinée. Dans un premier temps, un calcul analytique a été réalisé, suivi d'une modélisation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis dans le logiciel ANSYS. La conception géométrique de la colonne a été établie à l'aide de SolidWorks. Par la suite, les résultats numériques ont été utilisés pour générer un modèle d'intelligence artificielle (Réseau de Neurones Artificiels RNA). Ce modèle de RNA permet de prédire le stress maximal dans la colonne pour diverses conditions, éliminant ainsi la nécessité de réaliser des simulations pour chaque condition individuellement.

Mots clés : colonne de distillation, Code ASME, la méthode des éléments finis, fond, simulation, l'intelligence artificielle, Réseau de Neurones Artificiels (RNA).

Abstract- The objective of this study is to analyze the maximum stress resistance of a distillation column under pressure and temperature conditions, considering different types of heads. Additionally, the resistance of the column to hydrostatic testing, in accordance with the ASME code, will be examined. Initially, an analytical calculation was performed, followed by a numerical modeling using the finite element method in the ANSYS software. The geometry design of the column was performed using Solidworks. Subsequently, based on multiple simulation iterations, the results were utilized in artificial intelligence to develop an Artificial Neural Network (ANN) model. This ANN model enables the prediction of maximum stress in the column for various conditions, eliminating the need to conduct simulations for each condition individually.

Key words : distillation column, ASME Code, finite element, head, simulation, artificial intelligence, Artificial Neural Network (ANN)

ملخص - الهدف من هذه الدراسة هو تحليل مقاومة الاجهاد القصوى لعمود التقطير تحت عاملي الضغط و درجة الحرارة المتغيرين مع مراعاة انواع مختلفة للرؤوس. بالإضافة الى ذلك، سيتم دراسة مقاومة عمود التقطير للاختبار الهيدروستاتيكي واجراء حساب تحليلي وفقا للرمز (ASME). تليه محاكاة رقمية، باستخدام طريقة العناصر المحدودة في برنامج (ANSYS) و قد تم تصميم هندسة عمود التقطير باستخدام برنامج (Solidworks). ثم تم استخدام نتائج المحاكاة لصناعة قاعدة بيانات في برنامج الذكاء الاصطناعي من نوع الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN). مما يتيح التنبؤ بأقصى قدرة اجهاد في عمود التقطير لظروف مختلفة، دون الحاجة لإجراء محاكاة لكل ظرف على حدة .

كلمات مفتاحية: عمود التقطير، للرمز (ASME)، العناصر المحدودة، رؤوس، المحاكاة، الذكاء الاصطناعي، الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN).

Introduction générale

Introduction générale :

Un réservoir sous pression est défini comme un conteneur avec une pression différentielle entre l'intérieur et l'extérieur, la pression intérieure est généralement plus élevée que la pression extérieure, sauf dans certaines situations isolées, il se sont des conteneurs utilisés dans les champs pétroliers, les raffineries et d'autres industries pour traiter et stocker des fluides sous pression. Ils se caractérisent par une pression intérieure généralement plus élevée que la pression extérieure, à l'exception de 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 réservoirs sous pression permettent aux fluides stockés de subir des changements d'état, tels que dans le cas des chaudières à vapeur, ou de se combiner avec d'autres réactifs, comme dans les usines chimiques utilisant des colonnes de distillation. En raison des risques associés à leur rupture, les réservoirs sous pression sont conçus avec le plus grand soin pour éviter les explosions pouvant entraîner des pertes humaines et matérielles. Ils sont fabriqués à partir de matériaux fragiles, tels que la fonte, ou de matériaux ductiles, tels que le fer ou l'acier doux. Les réservoirs sous pression, qu'ils soient cylindriques ou sphériques, sont largement utilisés dans l'industrie pour le traitement, le transport et le stockage de liquides et de gaz sous pression. Lorsque le récipient sous pression est exposé à une pression, le matériau qui le compose est soumis à une charge de pression, et donc à des contraintes, provenant de toutes les directions. Les contraintes normales résultant de cette pression sont en fonction du rayon de l'élément considéré, de la forme de l'appareil de l'enceinte sous pression (c'est-à-dire cylindre ouvert, cylindre fermé ou sphère) ainsi que de la pression appliquée.

Deux types d'analyse sont couramment utilisés pour évaluer les réservoirs sous pression. La première méthode repose sur une approche mécanique simple et s'applique aux réservoirs à parois minces qui ne sont pas soumis à des pressions élevées, où le rapport entre le rayon intérieur et l'épaisseur de la paroi est inférieur ou égal à 10 ($r / t \leq 10$). La seconde méthode est basée sur la solution de l'élasticité et peut être utilisée pour les réservoirs à parois minces et à parois épaisses, indépendamment de ce rapport. Les deux méthodes d'analyse sont mentionnées dans le code ASME VII, div I et II (ASME CODE BOOK 2021). Sur la base de ces informations, une étude a été entreprise pour examiner les contraintes agissant sur la colonne 501E, surnommée "LA TOUR DE LAVAGE", du complexe GNL2/Z à Arzew Oran. Différentes méthodes analytiques et numériques, telles que la méthode des éléments finis, ont été utilisées pour vérifier la stabilité de cette colonne et garantir sa résistance aux conditions de travail maximales, notamment en termes de pression et de température.

État de l'art :

De nombreuses études antérieures se sont concentrées sur les performances des réservoirs sous pression et leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des différentes conditions et paramètres tels que la température interne et externe du réservoir, la pression du fluide à l'intérieur et la pression externe...

Ces études sont basées sur l'analyse par méthode des éléments finis (MEF).

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de dimensions, les matériaux de construction, la pression maximale admissible et les caractéristiques de conception du réservoir sous pression.

La plupart de ces chercheurs ont concentré sur les structures de forme cylindrique avec des fonds elliptiques ou hémisphériques, parce qu'ils s'agissent des géométries les plus courantes et les plus utilisées dans les applications industrielles à grandes échelles surtout le domaine pétrolier, au même temps ils sont moins coûteux.

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

Chandrakant R Kini (Oct. 2015) : En utilisant l'analyse FEA et de manière analytique, il a calculé la contrainte équivalente maximale (contrainte de Von Mises) et a également préparé un modèle tridimensionnel de la contrainte équivalente. [2]

Pour l'analyse par éléments finis, Il a constaté des écarts dans 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 $132,9742025 \text{ MPa} < 245 \text{ MPa}$, ce qui prouve que la conception de l'appareil sous pression était correcte et que le modèle tridimensionnel pouvait résister à la pression et aux températures de fonctionnement.

V. V. V. Wadkar (Déc. 2015) a analysé des réservoirs sous pression cylindriques à tête hémisphérique et a calculé la contrainte équivalente maximale à l'aide d'ANSYS et a comparé les résultats avec les valeurs théoriques. Dans son article, ils ont conclu que des valeurs plus faibles de contraintes équivalentes apparaissent dans les réservoirs sous pression à tête hémisphérique.

Et que la distribution des contraintes équivalentes est avantageuse dans le cas de la géométrie de la tête. [3]

Bhagat Meghraj Vitthal (2010) a effectué une analyse par éléments finis pour calculer les déformations et les contraintes dans chaque nœud. La comparaison entre les gammes bilinéaire et quadratique pour le même nombre d'éléments. il a constaté que la plage bilinéaire a une bonne variation tandis que la plage quadratique a une mauvaise variation par rapport aux valeurs exactes. Pour le même type d'élément avec des nombres différents, les résultats étaient attendus, c'est-à-dire qu'ils convergent vers les valeurs exactes lorsque le nombre d'éléments augmente. [4]

Zick (2014) a déterminé les contraintes dans les récipients cylindriques à différents endroits qui sont supportés par des selles. Zick a analysé quels récipients doivent être conçus

Introduction générale

pour la seule pression interne et quelle est la rigidité requise pour les récipients, en connaissant les contraintes. [5]

Tapan Majumder (Jun. 2014) Les cylindres composés multicouches sont adaptés aux pressions de fonctionnement élevées.

Les résultats indiquent que, dans des conditions optimales, la contrainte sur les surfaces intérieures de tous les cylindres est égale à la limite d'élasticité des matériaux utilisés pour les cylindres composés multicouches. L'utilisation de réservoirs composés multicouches permet d'économiser des matériaux par rapport aux réservoirs à paroi pleine.

Cela diminue non seulement le poids du cylindre composé, mais aussi le coût du matériau nécessaire à la fabrication du cylindre composé multicouche. [6]

Gedam et Bhope (Novembre 2015) ont analysé un réservoir sous pression cylindrique mince pour différents raccords d'extrémité par analyse et éléments finis.

La distribution des contraintes dans l'enceinte sous pression pour différents raccordements d'extrémité, à savoir hémisphérique, circulaire plat, ellipsoïdal standard et en forme d'entonnoir, ont été comparées. [7]

Kolekar et Jewargi (May 2015) ont calculé les contraintes approximatives qui existent dans les récipients sous pression cylindriques soutenus par deux supports par deux selles sous différents types de raccordements d'extrémité en utilisant la méthode des éléments finis. L'analyse structurelle statique a été effectuée pour calculer les contraintes dans la cuve ont été modifiées avec le matériau composite jusqu'à ce que la contrainte maximale de von-Mises soit dans les limites. Il a été conclu que lorsque les raccords d'extrémité de l'appareil être sous pression, la zone de concentration des contraintes change pour la même pression. [8]

Objectif de ce travail :

Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de l'obtention d'un diplôme de master en mécanique des unités pétrochimiques, a comme objectif d'étudier la résistance et les différentes contraintes exercées sur la colonne de séparation TOUR DE LAVAGE avec le changement des fonds et des conditions de opératoires (pression et température) en utilisant le logiciel ANSYS ainsi que le calcul analytique. De l'autre côté, la résistance de la colonne aux poussées de vent et au test hydrostatique a été examinée. Par la suite, la méthode de l'intelligence artificielle (Artificial Neural Network) a été considérée pour la prédiction des contraintes dans les différentes parties de la colonne d'une façon précise.

Organisation de ce travail :

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

- Une introduction générale sur les réservoirs sous pression et les différentes recherches associées à notre travail.
- Le premier chapitre est concernant les généralités des réservoirs sous pression, les différents types les plus utilisés, en particulier pour les colonnes de distillation. Également, ce chapitre est consacré pour les logiciels utilisés, l'analyse des différentes contraintes selon le code ASME, ainsi que des généralités sur l'intelligence artificielle
- Le deuxième chapitre concerne une vérification de stabilité de la colonne 501E par le calcul analytique des contraintes appliquées sur chaque partie de la colonne, calcul de l'épaisseur minimal requis des parois de la colonne et la pression maximale admissible selon le code ASME en considérant l'essai hydrostatique et la poussée de vent.
- Le troisième chapitre concerne la modélisation de la colonne 501E en considérant différentes conditions opératoires de pression et de température. Par la suite, un programme d'intelligence artificielle a été développée pour prédire la contrainte maximale exercée sur la colonne.
- Le quatrième chapitre traite les résultats obtenus de nos simulations numériques concernant l'influence des conditions opératoires (pression et température) pour différents types des fonds. Également, une comparaison entre le calcul analytique et les résultats numériques a été effectuée.
- Une conclusion générale sur notre travail.

Chapitre I : Etude théorique

Chapitre I : L'Etude Théorique

I.1 Introduction :

Les réservoirs, les colonnes qui traitent, stockent ou reçoivent des fluides sont appelés réservoirs sous pression. Appareil à pression est défini comme un récipient présentant une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. La pression intérieure est généralement plus élevée que la pression extérieure, sauf dans certaines situations isolées.

Lorsque l'on parle d'appareils à pression, il faut également prendre en compte les réservoirs.

Les réservoirs sont très différents en termes de conception et de construction : les réservoirs, contrairement aux réservoirs sous pression, sont limités à la pression atmosphérique ; les réservoirs sous pression ont souvent des parois internes alors que la plupart des réservoirs n'en ont pas.

Les réservoirs sous pression ont souvent des parties internes, ce qui n'est pas le cas de la plupart des réservoirs (et ceux qui en ont sont limités aux serpentins de chauffage ou aux mélangeurs).

Chaque appareil sous pression doit être exploité dans les limites de température et de pression prévues, qui constituent les limites de sécurité de l'appareil. La conception, la construction et les essais des appareils sous pression sont réalisés par un personnel compétent et sont régis par des réglementations, car la libération et la fuite accidentelles de leur contenu constituent un danger pour le milieu environnemental. Certaines des normes les plus connues sont le code des chaudières et des appareils à pression de **l'American Society of Mechanical Engineers (ASME BPVC), section VIII**, et le **code d'inspection des appareils à pression 510 de l'American Petroleum Industry (API)**. [1]

I.2 Classification des réservoirs sous pression :

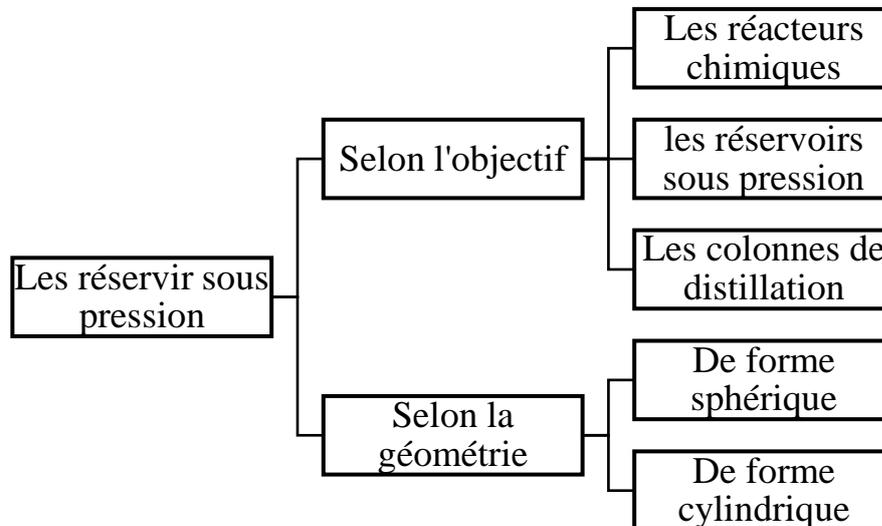


Figure II- 1 classification des réservoirs sous pression [9]

Il existe plusieurs réservoirs sous pression, mais la plupart se répartissent en deux grandes catégories. La première catégorie de réservoirs sous pression est basée sur l'objectif. Ces réservoirs sont utilisés pour une application industrielle particulière et les fabricants les construisent pour répondre aux exigences de ses utilisations.

La deuxième catégorie de réservoirs sous pression est basée sur la forme géométrique. La forme d'un réservoir sous pression peut également affecter l'efficacité d'applications spécifiques, car certaines formes modifient la diffusion des substances dans un réservoir. Cela peut avoir des effets sur la température et la pression.

I.2.1 Selon l'objectif :

I.2.1.1 Les réacteurs chimiques :

Les réacteurs chimiques sont tous réservoirs sous pression présentant une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, ont le rôle de traitement dans l'industrie ou de contenir les réactifs dans une réaction chimique.

I.2.1.2 Les colonnes de distillation :

Une colonne, aussi appelé tour, est un équipement circulaire disposé verticalement d'une hauteur bien supérieure à son diamètre.

Utilisé principalement dans les raffineries le terme de « colonne » est souvent employé pour les colonnes de distillation. Elles permettront dans ce cas précis de séparer les fractions d'hydrocarbures contenues dans le pétrole, les unes des autres.

I.2.1.3 Les 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°C

I.2.2 Selon la géométrie :**I.2.2.1 De forme sphérique :**

Réservoirs sous pression de forme sphérique, généralement utilisés pour stocker des fluides à haute pression en raison de leur intégrité structurelle accrue, mais ils sont coûteux et difficiles à fabriquer.

La forme sphérique d'un réservoir présente une répartition des contraintes internes sur toute la surface ce qui la donne une structure solide sans points faibles de concentration de contraintes.

I.2.2.2 De forme cylindrique :

Les réservoirs de forme cylindrique sont les plus utilisés dans l'industrie en raison de leur polyvalence et leur coût de constructions inférieur à celui des réservoirs sphériques.

Les réservoirs sous pression cylindriques sont composés d'une virole cylindrique et d'un ensemble de fonds. La virole cylindrique est le corps de l'appareil sous pression. Les fonds servent d'embouts ou d'enceintes à la virole pour couvrir le contenu de l'appareil. Les fonds peuvent avoir un profil plus plat ou plus arrondi. Ce dernier réduit la faiblesse du récipient cylindrique.

Dans notre travail on va étudier un réservoir sous pression de forme cylindrique qui est une colonne de distillation. [9]

I.3 Les composants d'un réservoir sous pression :

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

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

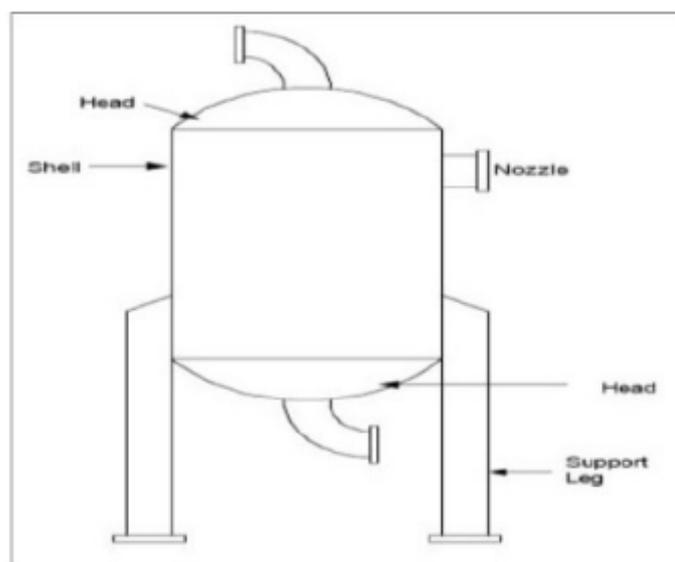


Figure II- 2 les composants d'un réservoir sous pression [10]

I.3.1 Les fonds :

Le fond est un des principaux facteurs qui contribuent largement au comportement des contraintes, c'est une zone critique qu'il faut étudier et analyser pour faire un bon choix de type du fond approprié aux conditions de fonctionnement du réservoir sous pression

I.3.1.1 Les différents types des fonds :

- **Fonds plats :**

Ou les têtes plates ou plaques, sont le type le plus simple de fermetures d'extrémité utilisées uniquement pour les petites embarcations.

Elles peuvent être utilisées comme couvercles de trou d'homme dans les cuves à basse pression et comme couvercles de petites ouvertures.

- **Fonds hémisphériques :**

Une tête hémisphérique est la forme la plus solide et elle est capable de résister à près de deux fois la pression d'un fond Tori sphérique de même épaisseur. Le coût de formation d'un fond hémisphérique est plus élevé que celui d'un fond Tori sphérique peu profonde. La quantité de formage nécessaire pour produire une forme hémisphérique est plus importante, ce qui se traduit par un coût de formage plus élevé. Comme elles sont plus coûteuses à former, elles sont réservées aux applications à haute pression.

- **Fonds ellipsoïdaux :**

Les fonds ellipsoïdaux sont souvent utilisés pour des pressions supérieures à 10 bars. En coupe, la tête ressemble à une ellipse dont le rayon varie continuellement. Il en résulte une transition en douceur entre le dôme et la partie cylindrique de la cuve. La forme du fond ellipsoïdal est définie par le rapport entre le grand et le petit axe. Une disposition standard sur les navires est le fond elliptique. En raison de la forme légèrement bombée, le coût du formage est réduit peu profonde, le coût de formage est réduit.

- **Fonds Tori sphériques :**

Une forme Tori sphérique, qui est largement utilisée comme fermeture d'extrémité pour une grande variété d'appareils à pression cylindriques.

La forme est proche de celle d'une ellipse, mais elle est plus facile et moins coûteuse à fabriquer. Les fonds Tori sphériques sont constitués d'une coupelle à rayon constant.

L'assemblage direct de la coupelle à la section cylindrique du récipient entraîne un changement rapide de la géométrie, ce qui provoque des contraintes locales excessives. Pour éviter cela, une section de transition (Kunckel) a été ajoutée.

Pour éviter cela, une section de transition (Kunckel) est utilisée entre la coupelle et le cylindre. Ils sont généralement utilisés pour les applications à très haute pression.

Fonds coniques : Les fonds coniques sont largement utilisés comme têtes de fond pour faciliter l'extraction ou la vidange du fluide. L'angle du demi-cône est généralement de 30°

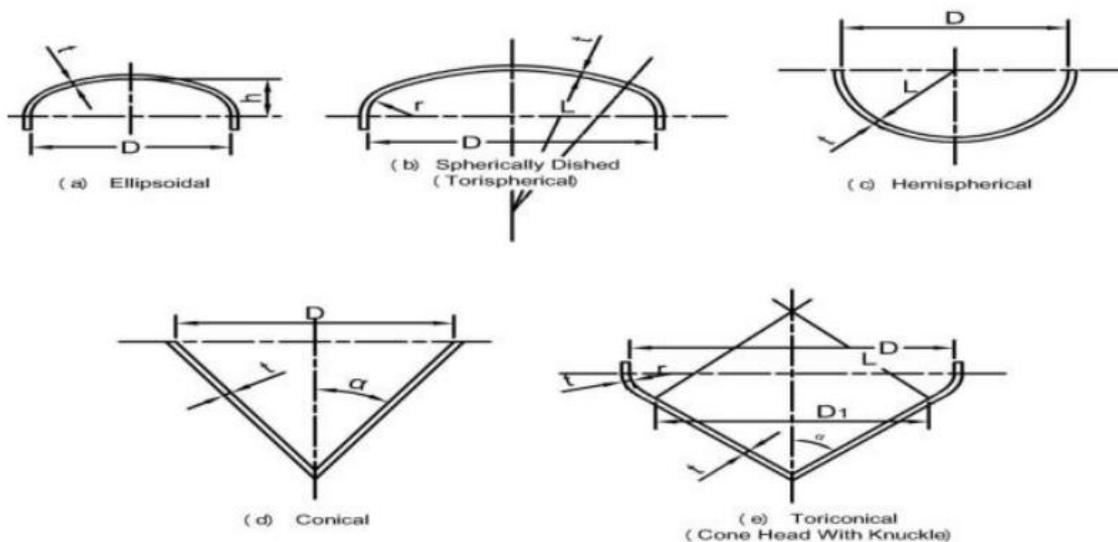


Figure II- 3 Les différents types des fonds [11]

I.3.2 La virole :

La virole est l'élément principal qui contient la pression. Les viroles sont des réservoirs sous pression sont soudées entre elles pour former une structure ayant un axe de rotation commun.

I.3.3 Les tubulures :

Une tubulure est un composant cylindrique qui pénètre dans la virole ou les fonds d'un récipient sous pression. Les extrémités de la buse sont généralement bridées pour permettre les raccordements nécessaires et pour permettre un démontage facile à des fins d'entretien ou d'accès. [11]

I.4 La distillation :

I.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.

Sous l'effet de la chaleur ou d'une faible pression (loi des gaz parfaits), les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat.

La distillation est la méthode de séparation la plus économique pour les mélanges liquides. Toutefois, elle peut être gourmande en énergie. La distillation peut consommer plus de 50 % des coûts énergétiques d'exploitation d'une usine. Il existe des alternatives à la distillation, comme l'extraction par solvant, la séparation par membrane ou le processus d'adsorption. En revanche, ces procédés ont souvent des coûts d'investissement plus élevés. Par conséquent, la distillation reste le choix principal dans l'industrie, en particulier dans les applications à grande échelle.

I.4.2 Le principe de la distillation :

La vaporisation d'un mélange permet d'obtenir deux phases.

-Une phase vapeur riche en produits légers mais contenant encore des traces de produits lourds.

-Une phase liquide riche en produits lourds mais contenant encore des produits légers.

En continuant à vaporiser le mélange, la phase vapeur va augmenter jusqu'à la vaporisation totale du liquide mais on n'aura pas obtenu de séparation ; la concentration des constituants du mélange initial se trouvera entièrement sous forme de vapeur à partir de ce mélange.

Si on condense la vapeur obtenue avant sa vaporisation complète, on obtient un liquide de même composition que la phase vapeur avant sa condensation ; c'est à dire un liquide riche en produits légers.

Si on maintient cette phase liquide en ébullition, elle va émettre des vapeurs encore plus riches en produits légers, qui ; après condensation et vaporisation donneront un produit de plus en plus riche en légers au fur et à mesure que l'opération sera répétée. Pour arriver à une séparation, il faudrait donc procéder à des condensations et des vaporisations successives ; c'est la distillation fractionnée. A chaque étape l'énergie sera nécessaire.

Ces distillations successives se font dans des colonnes munies de plateaux. Le courant de vapeur est ascendant, tandis que le liquide provenant de la condensation partielle des vapeurs, rétrograde des plateaux supérieurs vers les plateaux inférieurs par gravité.

Des échanges de chaleur sont réalisés par les fluides eux-mêmes (vapeurs et condensât). La phase vapeur émise au plateau inférieur étant plus chaude que la phase liquide du plateau suivant (apport de calories par la phase vapeur à la phase liquide, condensation partielle de la phase vapeur et vaporisation partielle de la phase liquide etc....) [12]

I.4.3 Les types de distillation :

I.4.3.1 La distillation atmosphérique :

La distillation atmosphérique est un procédé de distillation qui consiste à séparer les unes des autres les fractions d'hydrocarbures contenues dans le pétrole brut. C'est la première étape

du raffinage du pétrole, et les toutes premières raffineries de pétrole se résument à peu près à une colonne de distillation.

Son fonctionnement est fondé sur la différence des températures d'ébullition de chacun des produits purs contenus dans le pétrole.

I.4.3.2 La distillation sous vide :

La distillation sous vide est réservée au fonctionnement de produits contenant des hydrocarbures lourds dont les températures d'ébullition normales seraient au seuil du Craquage. Elle est utilisée surtout pour les produits nobles pour lesquels il faut éviter toute trace d'altération par décomposition thermique.

Elle permet en effet :

- La fabrication des huiles de distillats lubrifiants qui, après traitement, serviront de base pour les huiles commerciales
- La redistillation de ces huiles après traitements au solvant.
- La redistillation de certaines essences spéciales
- La préparation de charge des unités de craquage pour obtenir un gasoil sous vide à partir d'un résidu atmosphérique.

I.4.4 La colonne de distillation :

La colonne est constituée par une succession de plateaux au niveau desquels existe un équilibre liquide/vapeur qui lui les caractérise.

On constate ainsi que pour une pression et une alimentation de composition données, le paramètre déterminant est la température ; qu'il s'agit de maintenir à une valeur fixée pour chacun des plateaux.

Cette échelle de température sera déterminée par les températures de tête et de fond de la colonne ; elles-mêmes fixées par le condenseur et le rebouilleur.

I.4.4.1 Dimensions d'une colonne :

Elle est dépendante de :

- La composition du mélange et de la nature des constituants
- Leur point d'ébullition et de la teneur en vapeur
- La pureté des produits à obtenir (la hauteur détermine le nombre de plateaux d'où la difficulté du fractionnement ; donc la pureté voulue).
- La quantité des produits et leur débit (diamètre)

Dans le fractionnement continu, la charge de la colonne se fait dans une zone déterminée appelée « zone de flash ou zone d'expansion ». Cette zone est démunie de plateaux. Dû au flash, l'alimentation se divise en deux phases très distinctes dont la température correspond au cycle condensation / vaporisation dans la zone considérée.

I.4.4.2 Les plateaux :

Dans les réalisations industrielles, les systèmes les plus employés pour assurer l'échange vapeur ascendante / liquide rétrogradant sont les plateaux. Il existe d'autres garnissages tels que les anneaux de raching... etc.

Un plateau comporte essentiellement un ensemble lui permettant de retenir une certaine hauteur de liquide plongeant dans une cuvette (afin d'éviter le passage des vapeurs) qui traverse horizontalement tout le plateau. C'est pendant cette traversée, que le liquide rencontre les vapeurs venant du plateau inférieur. La hauteur du déversoir conditionne le niveau du liquide sur le plateau. La vapeur entre en contact avec le liquide soit par l'intermédiaire de cloches ou de clapets, soit par de simples trous dans le plateau. Il est à noter ; que plus la hauteur du liquide sera grande, et plus la condensation sera importante ; par contre les pertes de charge seront élevées.

Donc, il est utile de chercher à réaliser dans ce cas un maximum de condensation avec des pertes de charge admissibles.

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.

Ainsi, en allant du bas vers le haut de la colonne, la température et la masse molaire du mélange décroissent. En tête de colonne ; on recueillera la vapeur constituée par les constituants légers (distillat après condensation) ; tandis qu'au fond, du liquide constitue par les constituants lourds (résidu). [12]

I.5 Analyse des contraintes agissant sur un réservoir sous pression :

Dans plusieurs domaines industriels, dont la chimie, l'énergie, l'industrie du pétrole et du gaz, et bien d'autres encore, les réservoirs de décompression sont des structures d'une importance vitale. Ils sont destinés à contenir des fluides à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. Différentes contraintes agissent sur la structure du réservoir pour préserver son intégrité lorsqu'il est soumis à une pression interne.

Les principales contraintes mécaniques et de flexion qui apparaissent dans un réservoir sous pression sont les contraintes de mouvement de la membrane. Les contraintes membranaires sont des forces homogènes agissant dans la direction perpendiculaire à la surface du réservoir. Elles résultent de la pression interne qui s'exerce pour enlever ou comprimer la lèvre du réservoir. Les contraintes de flexion, quant à elles, sont dues à la courbure du cylindre du réservoir et à la répartition inégale de la pression. [13]

I.5.1 stress membranaire :

Les récipients sous pression ont généralement la forme de sphères, cylindres, de cônes, d'ellipsoïdes, de tores ou d'éléments composites.

Lorsque l'épaisseur est faible par rapport à d'autres dimensions ($R/t > 10$), les récipients sont appelés membranes et les contraintes associées résultant de la pression contenue dans les récipients sont faibles. Les contraintes associées résultant de la pression contenue sont appelées contraintes membranaires. Ces contraintes membranaires sont des contraintes moyennes de tension ou de compression. Elles sont supposées uniformes sur la paroi de la cuve et agissent tangentiellement à sa surface. La membrane ou la paroi est supposée de n'offrir aucune résistance à la flexion. Lorsque la paroi offre une résistance à la flexion, les contraintes de flexion s'ajoutent aux contraintes membranaires. [13]

Dans un récipient de forme complexe soumis à une pression interne, les concepts simples de contraintes membranaires ne suffisent pas à donner une idée adéquate de la situation réelle des contraintes. Les types de fonds fermant un réservoir sous pression, les effets des supports, les variations d'épaisseur et de section, les buses, les fixations externes et la flexion générale due au poids, au vent et à l'activité sismique sont autant d'éléments qui entraînent des variations de contraintes. L'activité sismique sont autant de facteurs qui entraînent des répartitions variables des dans la cuve. Les écarts par rapport à la forme réelle de la membrane entraînent une flexion de la paroi de la cuve et font varier la charge directe d'un point à l'autre. D'un point à l'autre. La charge directe est déviée des parties les plus souples vers les parties les plus rigides de la paroi. [14]

La charge directe est déviée des parties les plus flexibles vers les parties les plus rigides de la cuve. Lors de la construction et de l'exploitation de systèmes membranaires, il est essentiel de tenir compte des restrictions imposées aux membranes. Pour garantir des performances optimales et une durée de vie plus longue des membranes, il faut examiner des paramètres tels que la pression de fonctionnement, les caractéristiques mécaniques des membranes et leur résistance aux produits chimiques.

Cet effet est appelé "redistribution du stress".

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

σ_h = contrainte circonférentielle

σ_L = contrainte Longitudinale

σ_r = contrainte radiale [14]

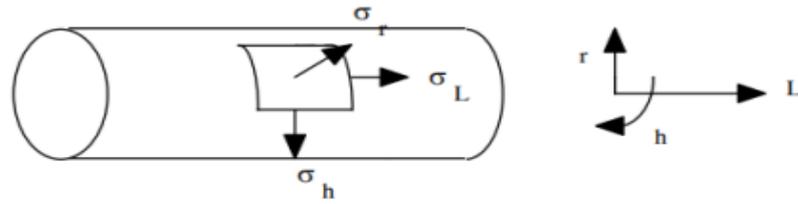


Figure II- 4 Les différentes contraintes appliquées sur la paroi de l'équipement [14]

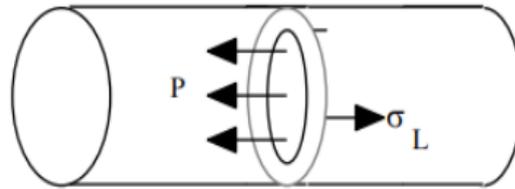


Figure II- 5 La contrainte longitudinale [14]

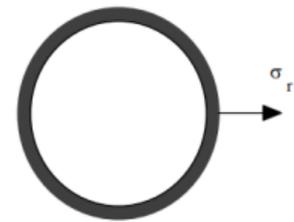
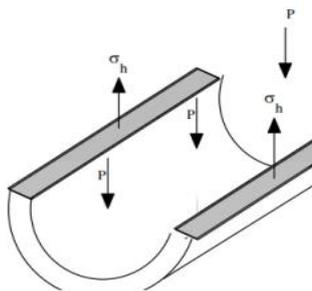


Figure II- 7 la contrainte radiale [14]

Figure II- 6 La contrainte circonférentielle [14]



I.5.2 Analyse des contraintes dans les appareils sous pression selon le code ASME :

Le code de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) propose des directives et des normes pour la conception, la construction et l'inspection des réservoirs sous pression. Lors de l'analyse des contraintes d'un réservoir conformément aux normes de ASME, il faut prendre en considération :

Contraintes membranaires : Le code ASME spécifie les contraintes maximales admissibles pour les contraintes circulaires et longitudinales de la membrane. Ces restrictions sont basées sur les caractéristiques du matériau du réservoir, la pression de service, les facteurs de sécurité et d'autres facteurs.

Facteur de flexibilité : Le code ASME a établi des normes de flexibilité pour la conception des réservoirs sous pression. Ces critères prennent en compte la relation entre les contraintes de membrane et les contraintes de flexion tout en tenant compte de la forme, de la taille et de la rigidité du réservoir.

Contrainte de fatigue : Le code ASME inclut des critères de contrainte de fatigue pour les réservoirs sous pression soumis à des cycles de charge répétés. Ces critères évaluent les contraintes cumulées et les comparent aux limites admissibles afin de prévenir les erreurs dues à l'usure.

Soudage : le code ASME spécifie certaines exigences pour les soudures utilisées dans les réservoirs sous pression. Il s'agit notamment des critères de création des soudures, des procédures de soudage qualifiées et des critères d'inspection visant à garantir la qualité des soudures et à réduire les contraintes résiduelles.

L'analyse des contraintes du code ASME garantit que la conception et la construction du réservoir sont conformes aux normes de sécurité établies. Le respect des directives de l'ASME est essentiel pour garantir la fiabilité et la sécurité des réservoirs sous pression, tout en se conformant aux exigences réglementaires et industrielles applicables. [13]

I.6 Présentation du code ASME :

L'American Society of Mechanical Engineers (ASME) a créé et publié un certain nombre de codes reconnus par l'industrie. Les règlements de l'ASME fixent des normes techniques pour un large éventail de disciplines techniques, notamment les appareils sous pression, la tuyauterie, le soudage, les centrales électriques, les chaudières, les réservoirs de stockage et bien d'autres encore. [15]

I.6.1 codes ASME utilisés couramment pour étudier les réservoirs sous pression :

- **Code ASME des chaudières et appareils à pression (BPVC) :** est largement utilisé dans l'industrie pour la conception, la construction et l'inspection des appareils à pression tels que les chaudières, les appareils à pression et les échangeurs de chaleur.
- **ASME Section VIII :** faisant partie du BPVC, ce code spécifie les critères de conception et de construction des équipements sous pression sous forme de récipients sous pression.
- **ASME Section IX :** ce code régit la qualification des opérations de soudage, des soudeurs et des opérateurs de soudage. [15]

I.7 Présentation des logiciels de simulation :**I.7.1 Le logiciel ANSYS :**

ANSYS est une suite logicielle qui permet aux ingénieurs et aux chercheurs de modéliser, de simuler et d'analyser le comportement de systèmes physiques dans divers domaines tels que la mécanique, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme, l'acoustique et bien d'autres. ANSYS offre de puissantes fonctionnalités permettant de résoudre des problèmes complexes à l'aide de méthodes de calcul et de modélisation numériques. Il est fréquemment utilisé dans l'industrie pour la conception et l'optimisation de produits, ainsi que pour la recherche et le développement dans divers domaines de l'ingénierie. [16]

I.7.1.1 utilisations d'ANSYS :

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

- **Ingénierie des systèmes mécaniques :** ANSYS permet de simuler des phénomènes mécaniques, notamment d'évaluer les fractures, la fatigue, les vibrations, les contraintes et les déformations. Les objets mécaniques tels que les voitures, les avions, les bâtiments et les équipements industriels l'utilisent tous dans leurs processus de conception et d'optimisation.
- **Dynamique des fluides :** Les outils de simulation d'ANSYS pour la dynamique des fluides permettent d'analyser l'écoulement des fluides, la combustion, la convection thermique, les turbomachines, la ventilation, etc. La conception de systèmes de refroidissement, de conduites d'eau, d'aérostructures, de moteurs, etc. peut en bénéficier.

- **La modélisation et l'analyse des phénomènes électromagnétiques** : tels que la propagation des ondes électromagnétiques, la compatibilité électromagnétique (CEM), la conception d'antennes, la magnétostatique, etc. sont réalisées à l'aide d'ANSYS. Les domaines des télécommunications, de l'électronique et de l'électromobilité peuvent tous en bénéficier.
- La propagation du son, les vibrations acoustiques, l'isolation acoustique : sont tous simulés et examinés par ANSYS. Il est utilisé pour créer des environnements et des produits acoustiques, notamment dans les domaines du transport, de la construction et de l'ameublement.
- **Génie civil** : analyser et créer des constructions civiles telles que des ponts, des barrages, des tunnels, des gratte-ciels, etc. Pour garantir la sécurité et l'efficacité des structures, il est utilisé pour modéliser les charges, les contraintes, les déformations et la stabilité des structures.

Ces exemples d'utilisation ne couvrent qu'un petit pourcentage des applications d'ANSYS ; le programme est également utilisé dans un large éventail d'autres secteurs, notamment l'énergie, l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, la biomécanique et bien d'autres encore. Il est apprécié pour son adaptabilité ainsi que pour ses capacités de modélisation et de simulation sophistiquées. [16]

I.7.1.2 ANSYS Workbench :

ANSYS Workbench est une plateforme de gestion de projet intégrée et d'analyse de simulation développée par ANSYS. Il possède une interface graphique simple qui permet aux utilisateurs de développer, de configurer, d'exécuter et d'analyser des modèles de simulation complexes.

ANSYS Workbench intègre une variété de technologies analytiques, de pré- et post-traitement, y compris ANSYS Mechanical, ANSYS Fluent, ANSYS Static Structural, ANSYS CFX et ANSYS HFSS. Les utilisateurs ont ainsi accès à un ensemble varié de capacités de simulation dans un environnement de travail unique.

Les utilisateurs peuvent rapidement gérer et organiser leurs simulations à l'aide des outils de gestion de projet de Workbench, qui permettent de créer des projets, de stocker et d'organiser les fichiers de simulation, de gérer les configurations des modèles et d'effectuer des analyses paramétriques. [16]

I.7.1.3 ANSYS « Static Structural » :

Le progiciel ANSYS comprend un module d'analyse appelé ANSYS Static Structural. Il est utilisé pour effectuer des analyses de structures statiques linéaires et non linéaires. [16]

I.7.1.4 utilisation d'ANSYS « Static Structural » :

- **Analyse des structures :** ANSYS Static Structural permet de modéliser et d'évaluer le comportement des structures sous charges statiques telles que les contraintes, les déformations, les contraintes de contact, les déplacements, etc. Il est utilisé en génie mécanique, en génie civil et en aérospatiale pour évaluer la résistance, la stabilité et les performances des structures.
- **La technique des éléments finis (FEM) :** utilisée par ANSYS Static Structural pour discrétiser la géométrie en éléments plus petits et résoudre les équations de comportement structurel. Cela permet de prendre en compte les non-linéarités matérielles, géométriques et de contact, ce qui se traduit par une analyse plus précise et plus réaliste.
- **Chargement et conditions aux limites :** Les utilisateurs peuvent décrire de nombreuses sortes de charges telles que des forces, des moments, des pressions, des températures, etc., ainsi que des conditions limites telles que des fixations, des glissements, des connexions, etc. Cela permet de simuler des événements réels et d'analyser le comportement des structures dans des conditions spécifiques. Cela permet de simuler des scénarios réels et d'analyser le comportement des structures dans des conditions spécifiques.
- **Non-linéarité :** ANSYS Static Structural peut analyser des structures non linéaires et modéliser des caractéristiques telles que la plasticité, le contact, les déplacements massifs, les matériaux hyperélastiques, etc. Cela permet de simuler des problèmes impliquant un comportement non linéaire des matériaux ou une géométrie de structure.
- **Pré et post-traitement des résultats :** Pour la visualisation et l'interprétation des résultats analytiques, le module offre des fonctions complètes de pré- et de post-traitement. Des graphiques, des tableaux et des outils d'animation permettent aux utilisateurs d'étudier les déformations, les contraintes, les déplacements, les facteurs de sécurité, les contraintes résiduelles.

ANSYS Static Structural est couramment utilisé dans l'industrie pour analyser les structures soumises à des charges statiques. Il possède des fonctions complètes de

modélisation et d'analyse qui permettent aux ingénieurs de porter un jugement éclairé sur la conception, la résistance et la performance des biens et des structures. [16]

I.7.2 logiciel SolidWorks :

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) en 3D largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, de la conception de produits et de la fabrication. Il possède des fonctions avancées de modélisation, de simulation, d'analyse, de gestion des données et de documentation technique.

De nombreuses organisations et professionnels de l'ingénierie utilisent ce programme pour concevoir et fabriquer un large éventail d'articles, notamment des machines, des pièces automobiles, des appareils médicaux, des équipements électroniques, des structures architecturales, etc. SolidWorks accélère le processus de conception en réduisant les erreurs, en optimisant les performances des produits et en raccourcissant les délais de mise sur le marché. [17]

I.7.2.1 Les fonctionnalités du logiciel SolidWorks :

- **Modélisation 3D :** Les puissants outils de modélisation de SolidWorks nous permettent de générer des modèles 3D exacts de pièces et d'assemblages. Il est possible de créer des formes géométriques, des surfaces complexes, des pièces moulées, des tôles et d'autres objets.
- **L'assemblage :** les éléments individuels peuvent être assemblés pour former des assemblages complets. SolidWorks dispose d'outils permettant de définir les liaisons sous contrainte des composants, d'évaluer les interférences, de simuler les mouvements et les mécanismes et d'effectuer des analyses d'assemblage.
- **Simulation :** SolidWorks comprend des outils de simulation permettant d'évaluer les performances et le comportement des conceptions. L'analyse des contraintes, l'analyse de la température, l'analyse de la fatigue, la simulation des fluides, la simulation des mouvements et d'autres fonctions sont disponibles.
- **Gestion des données :** SolidWorks offre des fonctionnalités de gestion des données pour nous aider à organiser et à gérer vos fichiers de conception. Le contrôle des versions, la gestion des révisions, le contrôle de l'accès aux fichiers et la collaboration avec d'autres utilisateurs sont tous possibles.

- **Dessins techniques** : SolidWorks génère automatiquement des mises en plan techniques à partir des modèles 3D. Pour créer des dossiers de fabrication précis, on peut construire des vues en coupe, des dimensions, des notes et des nomenclatures.
- **Visualisation et rendu** : Pour obtenir des photos de haute qualité, on peut effectuer le rendu de modèles 3D avec des matériaux, un éclairage et des ombres réalistes. SolidWorks dispose également de fonctionnalités de réalité virtuelle (VR) qui nous permettent de visualiser les conceptions dans un environnement immersif.
- **Usinage et fabrication** : SolidWorks comprend des fonctions permettant de créer des parcours d'outils, des programmes d'usinage et des instructions pour les machines-outils à commande numérique. On peut optimiser le processus de fabrication et déterminer la viabilité de la production. [17]

I.7.2.2 La modélisation 3D par SolidWorks :

SolidWorks propose des outils puissants pour la modélisation 3D, ils permettent de créer des modèles précis des pièces et d'assemblages. Dans SolidWorks ; on peut trouver les fonctionnalités de modélisations 3D suivants :

- **Création de pièces** : SolidWorks permet de créer des composants de différentes manières. Commencez par des formes fondamentales telles que des cubes, des cylindres, des sphères, etc., puis modifiez-les pour obtenir la forme souhaitée. Des extrusions, des révolutions, des balayages, des nervures, des congés et d'autres fonctions de construction de formes sont également disponibles.
- **Modélisation de surface** : Les outils de modélisation surfacique sont disponibles dans SolidWorks en plus des fonctions de modélisation solide. Ils permettent de concevoir des structures plus complexes en combinant des surfaces libres, des surfaces de balayage, des surfaces de loft et d'autres caractéristiques. Les surfaces peuvent ensuite être utilisées pour fabriquer des pièces solides ou des moules pour la production.
- **Fonctionnalités avancées** : SolidWorks comprend des fonctions avancées pour la gestion des formes complexes. Pour éditer et modifier vos modèles 3D, par exemple, l'utilisation des fonctions de coupe, de lissage, de raccordage, de rognage, de fractionnement, etc.
- **La bibliothèque de pièces standard préconçues** : telles que des vis, des écrous, des roulements, des ressorts, etc. En utilisant des composants prêts à l'emploi, l'accélération du processus de conception.

- **Modification du modèle :** Une fois que la construction un modèle 3D est prête, SolidWorks nous permet de le modifier facilement. En peut effectuer des modifications dimensionnelles, modifier des formes et ajouter ou supprimer des fonctionnalités tout en visualisant l'effet des modifications sur votre conception en temps réel.
- **Interopérabilité :** SolidWorks peut importer et exporter des fichiers dans différents formats de CAO, notamment IGES, STEP, STL, DWG, etc. en peut ainsi travailler avec d'autres systèmes de CAO, partager vos modèles avec d'autres personnes et les utiliser dans de nouvelles applications de production ou d'ingénierie.

SolidWorks est un programme de CAO 3D robuste utilisé dans l'ingénierie et la conception de produits. SolidWorks permet aux utilisateurs de construire des modèles 3D précis et réalistes grâce à ses puissants outils de modélisation, de simulation et de documentation technique. Il simplifie la conception de pièces et d'assemblages, ce qui permet des modifications rapides et des performances accrues. SolidWorks améliore la productivité des processus de conception, réduit les erreurs et accélère la production de produits de haute qualité grâce à sa facilité d'utilisation, ses bibliothèques de pièces standard et son interopérabilité. [17]

I.8 Méthode numérique « méthode des éléments finis »

I.8.1 Définition :

Choisie par le logiciel ANSYS Workbench, est une méthode générale pour résoudre les problèmes industriels en construisant très efficacement des modèles de simulation. Elle est actuellement appliquée dans des domaines très divers pour résoudre des problèmes de mécanique des solides et/ou de mécanique des fluides, des problèmes thermiques, d'électricité, d'électromagnétisme etc. La réalisation du modèle éléments finis est obtenue par l'assemblage d'éléments. Cette opération est appelée discrétisation ou maillage du modèle mécanique de la structure à étudier. La qualité des résultats est très fortement conditionnée par le maillage adopté. C'est une des raisons pour lesquelles il n'est pas suffisant de disposer d'un programme pour produire des simulations convenables de la réalité. Les problèmes qui se posent peuvent être caractérisés comme bidimensionnels (dans le cas particulier de distributions planes de contraintes ou de déformations, de l'étude de solides de révolution, de la flexion des plaques ou des coques) ou plus généralement tridimensionnels (solide de forme quelconque). Dans tous ces cas, le nombre des jonctions entre un « élément fini » quelconque,

supposé isoler par des frontières imaginaires, et les éléments qui l'entourent, est infini. Il est donc difficile à première vue de percevoir de quelle manière ce type de problème peut faire l'objet d'une discrétisation analogue. On peut surmonter cette difficulté (et obtenir ainsi l'approximation cherchée) de la manière suivante :

- A. Le milieu continu est divisé par des lignes ou des surfaces imaginaires en un certain nombre d'éléments fini « Maillage » ;
- B. Les éléments sont supposés reliés entre eux en un nombre fini de points nodaux situés sur leurs frontières. Les déplacements de ces points nodaux seront les inconnus de base du problème, exactement comme en simple calcul des structures discrètes ;
- C. On choisit une (ou des) fonctions permettant de définir de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque « élément fini » en fonction des déplacements de ses nœuds :

$$Q = \sum N_i q_i e = [N_i, N_j \dots] \{q_i, q_j \dots\} e \quad \text{I.1}$$

- Expression dans laquelle les fonctions N sont appelées fonctions de formes et q_e est un vecteur formé de l'ensemble des déplacements nodaux de l'élément considéré
- D. d) Ces fonctions de déplacement définissent maintenant sans ambiguïté l'état des déformations à l'intérieur d'un élément en fonction des déplacements nodaux. Ces déformations, jointes à d'éventuelles déformations initiales, et compte tenu des propriétés élastiques du matériau, définissent l'état des contraintes en tout point de l'élément et, par voie de conséquence, également sur ses frontières ;

L'expression de déformation écrite en notation matricielle sous la forme :

$$\{\epsilon\} = [B] \{q\} \quad \text{I.2}$$

[B] : Matrice des dérivées partielles des coefficients de pondération

Si on suppose le comportement élastique le plus général, la relation entre contraintes et déformations est linéaire et peut être mise sous la forme :

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad \text{I.3}$$

Dans laquelle [D] est une matrice d'élasticité où entrent les propriétés des matériaux.

On détermine un système de forces concentrées aux nœuds qui équilibre les contraintes s'exerçant aux frontières et d'éventuelles forces réparties : Si on spécifie un comportement linéaire qui se traduit par la loi précédente, on peut alors écrire :

$$\{F\} = [K]\{q\}$$

I.4

$[K]$ est la matrice de rigidité. [18]

I.8.2 Analyse par éléments finis :

L'analyse par éléments finis est une représentation mathématique d'un système physique comprenant une pièce/un assemblage (modèle), les propriétés des matériaux et les conditions aux limites applicables {communément appelés prétraitement}, la solution de cette représentation mathématique {solution} et l'étude des résultats de cette solution {posttraitement}. Les formes simples et les problèmes simples peuvent être, et sont souvent, réalisés à la main. La plupart des pièces et des assemblages du monde réel sont beaucoup trop complexes pour être réalisés avec précision, et encore moins rapidement, sans l'utilisation d'un ordinateur et d'un logiciel d'analyse approprié.

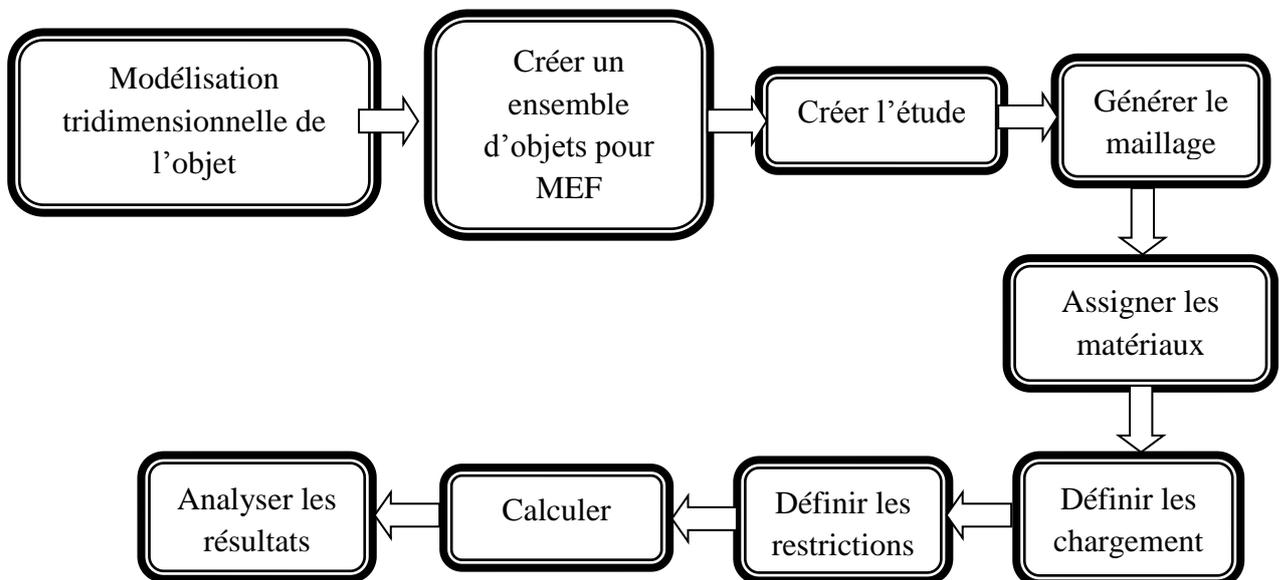


Figure II- 8 Les étapes de l'analyse par éléments finis [19]

I.8.2.1 Pré-traitement :

Le logiciel d'analyse par éléments finis utilise une représentation CAO du modèle physique et le divise en éléments finis, semblables à des pièces d'un puzzle en 3D. Ce processus est appelé "maillage" et vise à obtenir une représentation mathématique précise du modèle physique. Chaque élément relie des nœuds à l'aide d'équations basées sur la rigidité entre ces nœuds. Le choix de l'élément dépend du problème à résoudre. Chaque élément est bien compris individuellement. En combinant les comportements de tous les éléments à l'aide d'équations simultanées, on peut prédire le comportement de formes qui ne peuvent pas être

analysées avec des calculs basés sur des formules "en forme fermée" traditionnelles utilisées dans l'ingénierie classique.

I.8.2.2 Les éléments utilisés par ANSYS :

Les programmes modernes d'analyse par éléments finis, tels que ANSYS Workbench Simulation, utilisent une variété d'éléments sélectionnés pour leur polyvalence, leur robustesse et leur convivialité. Par défaut, Workbench Simulation utilise des éléments tétraédriques d'ordre supérieur (SOLID 187) pour les modèles solides et des éléments brique d'ordre supérieur (SOLID 186) pour les géométries balayables. Pour les modèles à surface fermée, des éléments de coque quadri-dominés (SHELL 181) sont utilisés, offrant une précision et une efficacité équilibrées tout en s'adaptant aux algorithmes de maillage automatique de Workbench Simulation. Pour les interactions entre les pièces dans les assemblages, des éléments de contact surface à surface (CONTACT 170/174) haut de gamme sont utilisés. Les modèles comprenant des éléments mixtes poutre/coque ou des caractéristiques de soudage par points utilisent des éléments de poutre (BEAM 188). ANSYS Workbench Simulation applique automatiquement ces différents types d'éléments en fonction de la géométrie et des caractéristiques du modèle

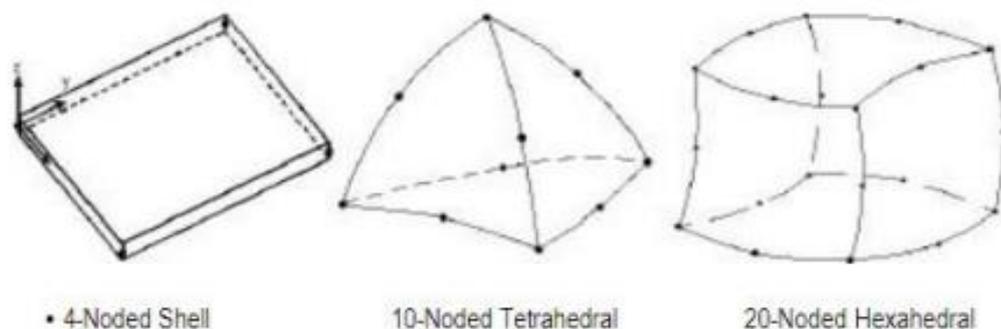


Figure II- 9 Les types des éléments utilisés par le logiciel ANSYS [19]

I.8.2.3 Post-traitement :

La sortie d'un solveur est généralement une quantité très importante de données brutes. Cette quantité de données brutes serait normalement difficile et fastidieuse à interpréter sans le tri des données et la représentation graphique que l'on appelle le post-traitement. Le post-

traitement est utilisé pour créer des représentations graphiques qui montrent la distribution des contraintes, des déformations, des températures et d'autres aspects du modèle. L'interprétation de ces résultats post-traités est la clé de l'identification des zones potentiellement préoccupantes (zones faibles d'un modèle), des zones de gaspillage de matériaux (zones du modèle supportant peu ou pas de charge), ou des informations précieuses sur d'autres caractéristiques de performance du modèle (thermiques, modales) qui ne seraient pas connues avant la construction et l'essai d'un modèle physique

La phase de post-traitement de l'analyse par éléments finis est celle où la réflexion la plus critique doit avoir lieu, où l'utilisateur examine les résultats (les chiffres par rapport aux contours en couleur, les mouvements, etc.) et compare les résultats avec ce à quoi on pourrait s'attendre. On n'insistera jamais assez sur le fait que c'est à l'utilisateur de déterminer si les résultats ont un sens, d'être capable d'expliquer les résultats en se basant sur le "bon sens" de l'ingénierie. Si les résultats sont différents de ceux escomptés, il faut chercher jusqu'à ce qu'une explication soit trouvée avant de pouvoir faire entièrement confiance aux résultats.

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** : Isoler des pièces d'un assemblage ou des faces d'une pièce et afficher les résultats uniquement sur ces zones.
- **Slicing** : Dessiner un plan de coupe à travers n'importe quelle figure de résultats, puis faire pivoter le modèle pour que la coupe soit visible. Plusieurs tranches à travers une même figure sont autorisées, tout comme la possibilité de faire glisser une tranche à travers la pièce.
- **Probe** : Affichez dynamiquement les résultats à la pointe du curseur. Le bouton gauche de la souris permet d'afficher les "étiquettes de sonde" des résultats sur le mode. [19]

I.9 Intelligence artificielle :

I.9.1 Définition :

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine qui évolue rapidement et qui a le potentiel de révolutionner notre mode de vie et de travail. Ces dernières années, elle a été appliquée à un large éventail d'industries et a montré des résultats prometteurs en termes d'amélioration de l'efficacité, de la précision et de la prise de décision. Selon un rapport récent de McKinsey,

l'IA pourrait contribuer à l'économie mondiale à hauteur de 13 000 milliards de dollars d'ici 2030 [20].

À la base, l'IA est une discipline d'étude qui se concentre sur la création de machines intelligentes capables d'effectuer des tâches qui requièrent généralement l'intelligence humaine, telles que l'apprentissage, la résolution de problèmes, la prise de décision et la perception. L'objectif de l'IA est de développer des systèmes capables de fonctionner de manière autonome, de s'adapter à de nouvelles situations et d'interagir avec les humains et l'environnement de manière naturelle et transparente [21].

D'un point de vue industriel, l'IA peut être définie comme le cerveau qui permet à un système de détecter son environnement, d'interpréter les données qu'il recueille, de résoudre des problèmes complexes et d'apprendre par l'expérience [22].

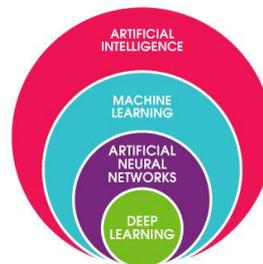


Figure II- 10 Représentation de l'intelligence artificielle et ses sous-domaines [30]

I.9.2 Apprentissage Automatique (Machine Learning) :

L'un des principaux moteurs de l'intelligence artificielle est l'apprentissage automatique, un sous-ensemble de l'IA qui se concentre sur le développement d'algorithmes capables d'apprendre à partir de données et d'améliorer leurs performances au fil du temps.

Les algorithmes d'apprentissage automatique organisent les données, en tirent des enseignements, recueillent des informations et font des prédictions sur la base des informations qu'ils ont analysées sans qu'il soit nécessaire de recourir à une programmation explicite supplémentaire. L'apprentissage automatique consiste à former un modèle à partir de données et à l'utiliser ensuite pour prédire de nouvelles données [23].

L'apprentissage automatique est un domaine vaste et en pleine expansion qui englobe de nombreux sous-domaines et approches qui peuvent être subdivisés en apprentissage supervisé, non supervisé, semi-supervisé et par renforcement [24-25].

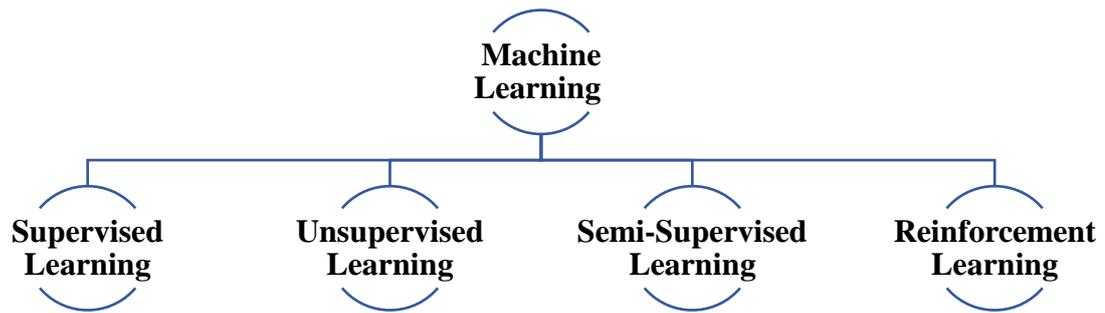


Figure II- 11 les sous-domaines de machine Learning[30]

I.9.2.1 Apprentissage supervisé (Supervised Learning)

Dans l'apprentissage supervisé, le modèle ML utilise des données de formation étiquetées. En d'autres termes, il reçoit des étiquettes avec la sortie appropriée et tente d'apprendre une correspondance entre les entrées et les sorties, en ajustant souvent le modèle de manière itérative. Ce processus est répété jusqu'à ce que le modèle atteigne un niveau de précision souhaité sur les données d'apprentissage et soit capable de prédire avec précision les sorties pour de nouveaux cas.

I.9.2.2 Apprentissage non-supervisé (Unsupervised Learning)

Dans l'apprentissage non supervisé, les données ne sont pas étiquetées, ce qui signifie que le modèle ML vise à découvrir des modèles inconnus dans les données, en recherchant des similitudes entre les points de données par exemple. Les algorithmes sont donc formulés de manière à ce qu'ils puissent trouver par eux-mêmes des modèles et des structures dans les données.

I.9.2.3 apprentissage semi-supervisé (Semi-Supervised Learning)

L'apprentissage semi-supervisé peut être considéré comme une combinaison de l'apprentissage supervisé et non supervisé. En fait, les données d'entrée sont un mélange de points de données étiquetés et non étiquetés, la quantité de données non étiquetées étant beaucoup plus importante que la quantité de données étiquetées dans la plupart des cas.

I.9.2.4 apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning)

Dans un système d'apprentissage par renforcement, au lieu de fournir des paires d'entrée et de sortie, nous décrivons l'état actuel du système, spécifions un objectif, fournissons une liste d'actions autorisées et leurs contraintes environnementales pour leurs résultats, et laissons le

modèle de ML expérimenter le processus de réalisation de l'objectif par lui-même en utilisant le principe d'essai et d'erreur pour maximiser une récompense [26].

I.9.3 Réseaux De Neurones Artificiels (Artificial Neural Network) :

I.9.3.1 Définition :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont un type de ML inspiré du principe de traitement de l'information dans les systèmes biologiques. Les RNA consistent en des représentations mathématiques d'unités de traitement connectées appelées neurones artificiels [26].

Comme les synapses dans un cerveau, chaque connexion entre les neurones transmet des signaux dont la force peut être amplifiée ou atténuée par un poids qui est continuellement ajusté au cours du processus d'apprentissage. Les signaux ne sont traités par les neurones suivants que si un certain seuil est dépassé, déterminé par une fonction d'activation.

En règle générale, les neurones sont organisés en réseaux comportant différentes couches. Une couche d'entrée reçoit généralement les données et une couche de sortie produit le résultat final. Entre les deux, il y a zéro ou plusieurs couches cachées qui sont responsables de l'apprentissage d'une correspondance non linéaire entre l'entrée et la sortie.

Bien qu'il n'y ait pas d'acceptation définitive sur la manière de créer un ANN, un modèle adapté à un problème et à un ensemble de données peut être créé par une méthode empirique ou en se référant à des études et à des hypothèses dans la littérature. Si le nombre de couches cachées d'un ANN est supérieur à ce qu'il devrait être, l'ANN risque de mémoriser et de réduire ses prédictions par rapport à de nouvelles données. Un nombre insuffisant de couches cachées peut entraîner une insuffisance de l'ANN pour résoudre le problème. Un autre problème rencontré Lors de la mise en place d'un ANN, il faut déterminer le nombre de neurones dans les couches. Dans la couche d'entrée, il y a autant de neurones que le nombre d'entrées, et dans la couche de sortie, il y a autant de neurones que la sortie souhaitée. Cependant, on ne sait pas ce qui se passe dans les couches cachées en raison de la nature de l'ANN, et les neurones ne peuvent donc pas être calculés dans les couches cachées. Il n'existe donc pas de méthode appropriée pour calculer le nombre idéal de neurones, mais il peut être déterminé par une méthode empirique ou certaines études proposent une méthode telle que les neurones de la couche cachée peuvent être calculés n , $n/2$, $2n$, $2n + 1$, $2n + 2$ pour n entrées. [27].

Les réseaux neuronaux artificiels sont particulièrement intéressants car leur structure flexible leur permet d'être modifiés pour une grande variété de contextes à travers tous les types de ML, c'est pourquoi les ANN peuvent être appelés "Shallow" ou "Deep" selon le nombre de couches cachées qu'ils contiennent.

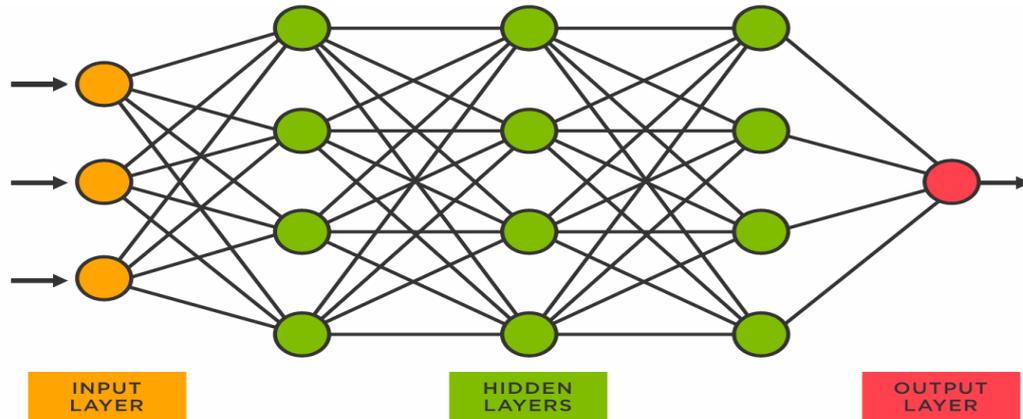


Figure II- 12 Diagramme d'Artificial Neural Network [31]

I.9.3.2 Types de réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks)

L'RNA de retour (Feedback ANN) : Dans ce type d'ANN, la sortie retourne dans le réseau pour obtenir les meilleurs résultats en interne. Selon le Centre de recherche atmosphérique de l'Université du Massachusetts à Lowell. Les réseaux de rétroaction renvoient l'information à l'intérieur du réseau et sont bien adaptés à la résolution des problèmes d'optimisation. Les corrections d'erreurs du système interne utilisent des réseaux ANN à rétroaction.

L'RNA d'anticipation (Feed-Forward ANN) : est un réseau neuronal de base composé d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie et d'au moins une couche de neurones. Grâce à l'évaluation de sa sortie en examinant son entrée, l'intensité du réseau peut être remarquée sur la base du comportement de groupe des neurones associés, et la sortie est décidée. Le principal avantage de ce réseau est qu'il parvient à évaluer et à reconnaître les modèles d'entrée [29].

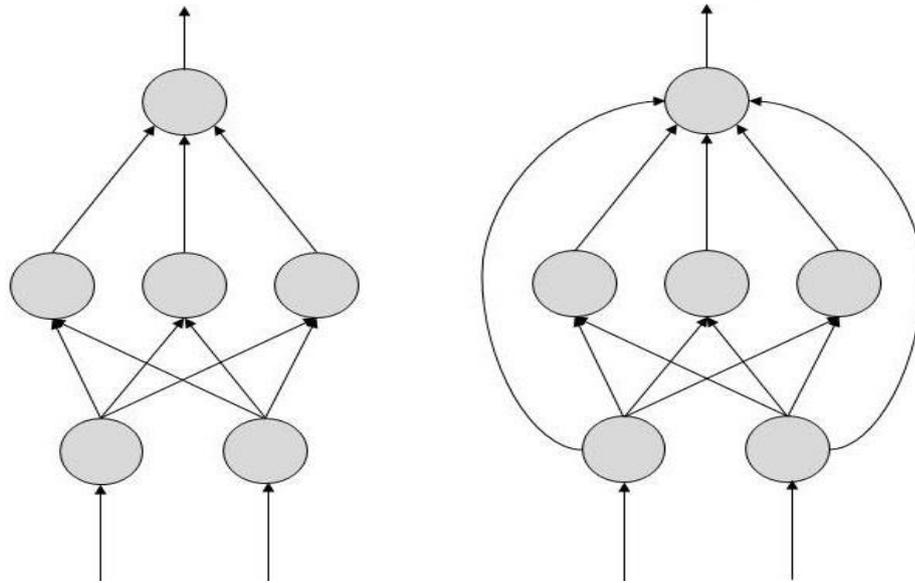


Figure II- 13 Diagramme de feedback et feed-forward ANN [32]

I.9.4 l'hyperparamètre RNA (ANN Hyperparameter) :

Un Hyperparameter est un paramètre constant dont la valeur est fixée avant le début du processus d'apprentissage. Les valeurs des paramètres sont dérivées par l'apprentissage. Le taux d'apprentissage, le nombre de couches cachées et la taille du lot sont des exemples d'Hyperparameter. Les valeurs de certains Hyperparameter peuvent dépendre de celles d'autres Hyperparameter. Par exemple, la taille de certaines couches peut dépendre du nombre total de couches [28].

Chapitre II : Calcul de vérification de stabilité de la colonne

Chapitre 02 : calcul de vérification de stabilité de la colonne

II.1 Introduction :

Les réservoirs sous pression sont utilisés pour stocker des fluides sous pression. Le fluide stocké peut subir un changement d'état à l'intérieur du récipient sous pression, comme dans le cas des chaudières à vapeur, ou il peut se combiner avec d'autres, réactifs, comme dans une usine chimique. Les réservoirs sous pression sont conçus avec le plus grand soin, car la rupture d'un réservoir sous pression est synonyme d'explosion et peut entraîner des conséquences graves humaines et matérielles. [7]

Le matériau des récipients sous pression peut être fragile, comme la fonte, ou ductile, comme l'acier doux. Les récipients sous pression cylindriques ou sphériques sont couramment utilisés dans l'industrie pour transporter des liquides et des gaz sous pression. Lorsque l'appareil sous pression est exposé à cette pression, le matériau qui le compose est soumis à une charge de pression et donc à des contraintes provenant de toutes les directions.

Par conséquent, on peut conclure que la stabilité d'un réservoir sous pression dépend de quelques paramètres comme la forme des fonds, l'épaisseur des différentes parties, la pression maximale admissible, la température de design, la résistance des poussées de vent et la résistance à l'essai hydrostatique. [1]

Alors on peut donner les définitions suivantes :

II.2 Définitions :

II.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 :

σ_L : Contrainte longitudinale

$$\sigma_L = \frac{PD}{4t} \quad \text{II.1}$$

σ_h : Contrainte circonférentielle (membranaire)

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t} \quad \text{II.2}$$

σ_r : Contrainte radiale (σ_r varie de P sur la surface interne à 0 sur la face externe.)

$$\sigma_r \approx P$$

II.3

- À paroi mince : $D \gg t$
- Donc : $\sigma_h, \sigma_L \gg \sigma_r$ [14]

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

II.2.2 La température de design :

La température de calcul est la température à laquelle le métal de l'équipement atteindra lorsqu'il est utilisé selon certaines règles. Cela dépend de la façon dont l'équipement est utilisé et de la pression qu'il subit. Certains équipements ont une température maximale de calcul (MDMT), ce qui signifie qu'il ne faut pas qu'ils dépassent cette température. Il y a aussi une température de calcul la plus basse, qui est la température la plus froide à laquelle les différentes parties de l'équipement peuvent être exposées en toute sécurité. Donc, en résumé, la température de calcul est une température importante à prendre en compte lorsque l'on conçoit un équipement pour s'assurer qu'il fonctionne correctement et en toute sécurité. [1]

II.2.3 La pression maximale admissible :

La pression utilisée dans la conception d'un récipient est appelée pression de calcul. Il est recommandé de concevoir un récipient et ses parties pour une pression supérieure à la pression de service. Une pression de calcul supérieure à la pression de service de fonctionnement de 10 %, la plus grande des deux étant retenue, répondra à l'exigence. La pression du fluide sera également prise en compte.

La pression de service maximale (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 plus élevée que celle spécifiée lorsque tout fonctionne comme prévu.

Cette pression est basée sur des calculs pour chaque élément du réservoir sous pression en utilisant des épaisseurs nominales sans tenir compte de la corrosion. Elle sert de base pour l'établissement des pressions de consigne de tout dispositif de décompression protégeant le récipient. [1]

II.2.4 L'épaisseur minimale requis :

L'épaisseur minimale requise fait référence à la plus petite épaisseur acceptable pour un matériau ou une structure particulière afin de garantir son intégrité, sa résistance et sa fonctionnalité. Elle est souvent déterminée par des normes d'ingénierie ou de conception, des codes ou des spécifications qui varient en fonction de l'application spécifique et des matériaux concernés.

L'épaisseur minimale requise est influencée par plusieurs facteurs, notamment les propriétés du matériau, l'utilisation prévue, les charges ou les contraintes attendues et les considérations de sécurité. Elle vise à prévenir les défaillances structurelles, les déformations

ou d'autres conséquences indésirables susceptibles de se produire si l'épaisseur tombe en dessous de la limite prescrite.

L'épaisseur requise doit être basée sur des considérations mécaniques et structurelles de pression, en utilisant les formules de conception appropriées et les contraintes admissibles du code ASME pour les services ayant des conséquences potentielles élevées en cas de défaillance, l'ingénieur doit envisager d'augmenter l'épaisseur requise au-dessus de l'épaisseur minimale calculée. [1]

II.3 L'essai hydrostatique :

L'essai hydrostatique est défini comme l'application d'une pression interne supérieure à la normale ou maximale à un segment de tuyauterie ou à un composant sous pression.

Cette pression est appliquée pendant une durée déterminée, à l'aide d'un liquide pour l'essai.

Le milieu d'essai préféré est l'eau sans additifs.

Toutes les mesures pratiques doivent être prises pour utiliser l'eau comme fluide d'essai avant d'envisager d'autres fluides d'essai en cas où l'eau ne peut être utilisé.

II.4 La colonne de distillation nouvelle 501E de complexe GNL2/Z :

II.4.1 Définition :

501E est une colonne de distillation qui constitue un système physique de séparation continue par transfert de matières entre deux phases travaillant à contre-courant. La séparation des constituants du GN partiellement condensé est réalisée par l'énergie sous forme de chaleur véhiculée par les phases en présence d'un :

- Rebouilleur
- Purgeurs à vide
- Pompes de reflux
- Refroidisseur

II.4.2 Dimensionnement et conditions de fonction de colonne de distillation 501E :

Tableau II- 1 Dimensions et conditions de fonctionnement de la colonne 501E

Les conditions de design	
Pression de design	4,96 MPa
Température de design	94 °C
Les conditions de fonctionnement	
Pression de service	3,8 MPa
Pression d'inspection	2,64 MPa
Température d'entrée	-10 °C
Température de sortie	-38 °C
Les diamètres	
La virole + le fond supérieur	3050 mm
La virole + le fond inférieur	1830 mm
Les rayons	
La virole + le fond supérieur	1525 mm
La virole + le fond inférieur	925 mm
Les épaisseurs	
Le fond supérieur	76 mm
Le fond inférieur	46 mm
La virole supérieure	64 mm
La virole conique	64 mm
La virole inférieure	39 mm
Les constants selon le code ASME	
« E » L'efficacité des joints	1
« S » la contrainte admissible σ_a	137 MPa

II.5 Calcul des contraintes :

Les propriétés du matériau sont les suivants :

Tableau II- 2 Les propriétés du matériau SA 240-304

Caractéristiques	Valeur
Le matériau	SA-240 304 (II. D metric p.86 ; ln.25)
La Densité	7750 Kg /m ³
Module de Young	193 GPa
Coefficient de poisson	0.31
La limite élastique	205.5 MPa

La contrainte maximale admissible du matériau SA-240 304 (II. D metric p.86 ; ln.25) peut être calculé d’après la limite élastique et le facteur de sécurité comme suite :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e^{tc}}{n} \quad \text{II.4}$$

II.5.1 La contrainte admissible :

$$\sigma_a = \frac{205.5}{1,5} = 137 \text{ Mpa}$$

Selon le code ASME, Section VIII, Division 1 et Division 2 les contraintes primaires qui dépassent la limite d’élasticité du matériau peuvent provoquer une défaillance ou une déformation importante. Une des contraintes primaires est la contrainte membranaire causée par la pression intérieure. Cette contrainte se produit sur toute la section transversale de la paroi. Loin des discontinuités telles que les intersections fonds-virole, partie conique –virole, buses et supports.

II.5.2 Calcul des contraintes membranaires :

II.5.2.1 Le fond supérieur :

Pour calculer la contrainte membranaire, en utilisant la relation suivante

$$\sigma_h = \frac{P_c R^2}{2th} \quad \text{II.5}$$

$$\sigma_h = 84.07 \text{ MPa}$$

II.5.2.2 Le fond inférieur :

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

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

$$\sigma_h = 77.60 \text{ MPa}$$

II.5.2.3 La virole :

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

II.5.2.3.1 Partie 01 : la virole supérieure :

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

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

$$\sigma_h = 118.18 \text{ MPa}$$

II.5.2.3.2 Partie 02 : la partie conique :

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

Pour calculer la contrainte membranaire on peut considérer la formule suivante

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

$$\sigma_h = 96.87 \text{ MPa}$$

II.5.2.3.3 Partie 03 : la virole inférieure :

Pour calculer la contrainte membranaire en utilisant la relation suivante

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

$$\sigma_h = 116.36 \text{ MPa}$$

II.6 Calcul de l'épaisseur minimale requis :

II.6.1 La virole

II.6.1.1 Partie 01 : la virole supérieure :

Selon le code ASME 8 division I

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

$$t = \frac{P_c R}{SE - 0.6P_c} \quad \text{II.6}$$

$$t = 56.43 \text{ mm}$$

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

II.6.1.2 Partie 02 : la virole conique :

Selon le code ASME 8 division I

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

$$t = \frac{PD}{2 \cos(\alpha)(SE - 0.6P)} \quad \text{II.7}$$

$$t = 58.7 \text{ mm}$$

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

II.6.1.3 Partie 03 : la virole inférieure :

Selon le code ASME 8 division I

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

$$t = \frac{P_c R}{SE - 0.6P_c}$$

$$t = 34.1 \text{ mm}$$

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

II.6.2 Le fond supérieur :

Selon le code ASME 8 division I :

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

$$t = \frac{P_c D}{2SE - 0.2P_c} \quad \text{II.8}$$

$$t = 51.80mm$$

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

II.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)] :

$$t = \frac{P_c D}{2SE - 0.2P_c}$$

$$t = 33.24mm$$

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

II.7 La pression de travail maximale admissible :**II.7.1 La virole :****II.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)] :

$$MAWP = \frac{SEt_c}{R + 0.6t_c} \quad \text{II.9}$$

$$MAWP = 5,60MPa$$

II.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)] :

$$MAWP = \frac{2SEt_c \cos(a)}{D+1.2t_c \cos(a)} \quad \text{II.10}$$

$$MAWP = 5,64MPa$$

II.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)] :

$$MAWP = \frac{SEt_c}{R+0.6t_c} \quad \text{II.11}$$

$$MAWP = 5,69MPa$$

II.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)] :

$$MAWP = \frac{2SEt_c}{D+0.2t_c}$$

$$MAWP = 6,79MPa$$

II.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)] :

$$MAWP = \frac{2SEt_c}{D+0.2t_c}$$

$$MAWP = 6,85MPa$$

II.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 2 tronçons :

- Le tronçon 1 de longueur $h_1 = 10000$ mm
- Le tronçon 2 de longueur $h_2 = 10140$ 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 : $X_1 = 5000$ mm
- Pour le tronçon 2 : $X_2 = 15070$ mm

II.8.1 Calcul de la poussée du vent :

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

$$P_i = K_i \cdot \beta_i \cdot q_i \cdot S_i \text{ [N]} \tag{II.12}$$

Avec

K_i : Coefficient aérodynamique, qui dépend de la nature de l'écoulement c'est-à-dire du régime aérodynamique $K_i = f(Re)$.

Re	$0,15 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^6$	10^6	$1,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
K	1,2	0,45	0,45	0,6	0,6

Re : Nombre de Reynold

$$Re = \frac{V_{air} \times D_{ex}}{\nu_{air}} \tag{II.13}$$

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

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 /m²]

q_i : Poussée spécifique du vent, $q_i = q \cdot \theta_i$ [N/m²]

q_0 : Poussée spécifique au niveau du sol, $q_0 = 450$ [N/m²], pour les côtières Algériennes

θ_i : Coefficient de surcharge qui dépend de H

Et on a

- si $H \leq 10$ m alors $\theta = 1$
- si $H > 10$ m alors $\theta = f(H)$

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

- $H_1 \leq 10$ m alors $\theta_1 = 1$

$$q_1 = q_0 = 45 \text{ [kgf/m}^2\text{]} \quad V_{air} = 3,3 \sqrt{45} = 22,14 \text{ [m/s]}$$

$$R_{e1} = \frac{22,14 \cdot 1,908}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 2,89 \cdot 10^6 \quad \text{Alors } K_1 = 0,6$$

- $H_2 > 10$ m alors $\theta_2 = 1,4$

$$q_2 = q_0 \cdot \theta_2 = 63 \text{ [kgf/m}^2\text{]} \quad V_{air} = 3,3 \sqrt{63} = 26,19 \text{ [m/s]}$$

$$R_{e2} = \frac{26,19 \cdot 3,178}{0,146 \cdot 10^{-4}} = 5,7 \cdot 10^6 \quad \text{Alors } K_2 = 0,6$$

β_i : Coefficient d'augmentation de la poussée spécifique qui tient compte de l'action dynamique du vent sur l'appareil,

$$\beta_i = 1 + \epsilon m_i \tag{II.14}$$

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
---	------	------	------	------	------

On a : $h_1, h_2 < 20$ m alors $m=0.35$

ϵ : Coefficient de dynamique qui dépend de la période T des oscillations propres de l'appareil

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

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

ϵ	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

$$T = 1,79H_c \sqrt{\frac{Q_{max} \cdot H_c}{g \cdot E \cdot I}} \quad \text{II.15}$$

Q_{max} : Charge maximale : $Q_{max} = 1830000$ [N]

E: Module de Young, $E = 1.93 \cdot 10^{11}$ [N/m²]

I : Moment d'inertie de la section de la jupe en m⁴

$$I = \frac{\pi}{64} (d_{ext}^4 - d_{int}^4) \quad \text{II.16}$$

d_{ext} : Diamètre extérieur de la jupe, $d_{ext} = 3080$ [mm]

d_{int} : Diamètre intérieur de la jupe, $d_{int} = 3048.5$ [mm]

H_c : La hauteur de la colonne

g : La gravité

$$I=0.177 \text{ [m}^4\text{]}$$

$$T=0.37 \text{ [s]}$$

$$T = 1,4 \text{ [s]} \quad \text{alors} \quad \varepsilon = 1.5$$

S_i : 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 métallique en augmente le diamètre de l'appareil de 20%).

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

Ainsi on aura :

- **Tronçon 1** : $S_1 = 1,83 \times 1,2 \times 10 = 21,96 \text{ m}^2$
- **Tronçon 2** : $S_2 = 3,05 \times 1,2 \times 10,14 = 37,11 \text{ m}^2$

Ainsi la valeur de l'effort du vent pour chaque tronçon est :

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

- **Tronçon 1** : $P_1 = 0,6 \times 1,525 \times 50 \times 21,92 = 9042,03 \text{ N}$
- **Tronçon 2** : $P_2 = 0,6 \times 1,525 \times 630 \times 39,77 = 21392,05 \text{ N}$

II.8.2 Calcul des moments fléchissant :

La valeur du moment fléchissant à l'encastrement sera prise comme étant la somme des moments dus à l'effort du vent des 3 tronçons par rapport à l'encastrement (section I-I).

$$M_V = \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i \tag{II.17}$$

P_i : L'effort du vent de chaque section de la colonne [N]

X_i : Distance de chaque section [m]

- **Tronçon 1** : $M_1 = P_1 \cdot X_1 = 9043,03 \times 5 = 45210,15 \text{ N.m}$
- **Tronçon 2** : $M_2 = P_2 \cdot X_2 = 22925,41 \times 15 = 322378,19 \text{ N.m}$
- **Donc** $M_v = M_1 + M_2 = 45210,15 + 322378,19$

$$M_V = 367588,34 \text{ N.m}$$

II.9 L'essai hydrostatique :

Le but de l'essai hydrostatique est de révéler les défauts de fabrication des colonnes et de détecter la présence de fuites. Il est à noter que la plupart des défauts de soudure ne peuvent être déterminés par l'essai hydrostatique et doivent être déterminés par d'autres formes d'essais non destructifs

II.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

$$\sigma_{fond} = \sigma_{\varphi} = \frac{P_c \times R^2}{2th} \quad \text{II.18}$$

Avec :

D : diamètre du fond inférieur

$$D = 1830 \text{ mm}$$

p_c : La pression du fond inférieur

$$p_c = P_{st} + P_{essai} \quad \text{II.19}$$

Avec :

P_{essai} : Pression d'essai hydrostatique

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

P_c : Pression de désigne

$P_c = 4,96 \text{ MPA}$ (selon manuelle de constructeur)

Alors :

$$P_{essai} = P_c + 10\% P_c \quad \text{II.20}$$

$$P_{essai} = 5,456 \text{ MPA}$$

II.9.2 Calcul de pression hydrostatique :

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

II.21

H : La hauteur de la colonne

g : L'accélération de pesanteur

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

ρ: Densité de liquide utilisé dans le test hydrostatique

Pour cet essai on utilise l'eau :

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

Alors :

$$P_{st} = 0,204 \text{ MPa}$$

Ce qui donne :

$$p_c = 5,456 + 0,204$$

$$p_c = 5,66 \text{ MPa}$$

II.9.3 La contrainte maximale au fond inférieur :

$$\sigma_{fond} = \sigma_{\varphi} = 88,52 \text{ MPa}$$

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

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

Chapitre III : modélisation numérique

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1 Introduction :

La modélisation numérique peut être utilisée pour étudier la résistance d'un équipement aux différents chargements pour déterminer différents paramètres : vitesse, déplacement, contrainte, température...

Plusieurs logiciels sont disponibles pour modéliser et étudier les récipients sous-pression, parmi celles-ci on peut citer le logiciel de SolidWorks.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks pour modéliser les différentes parties d'une colonne de distillation en utilisant le dessin technique reçu du complexe GNL2/Z de la colonne de distillation (nouvelle 501E),

III.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 :

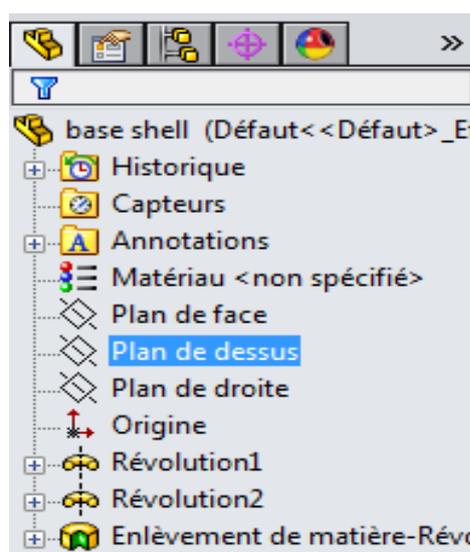
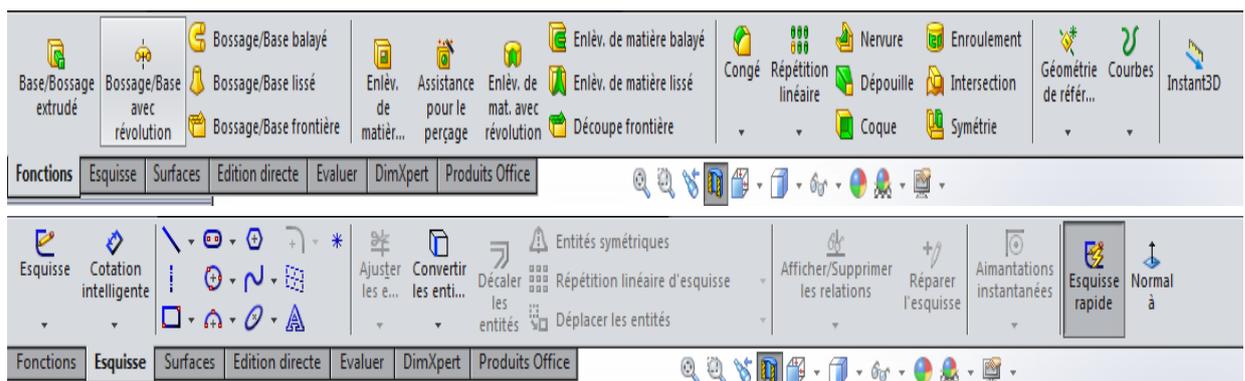


Figure III- 1 Les fonctions et les outils utilisés de SolidWorks

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 des anneaux de support.
- Finalement nous avons utilisé la fonction de bossage avec rotation

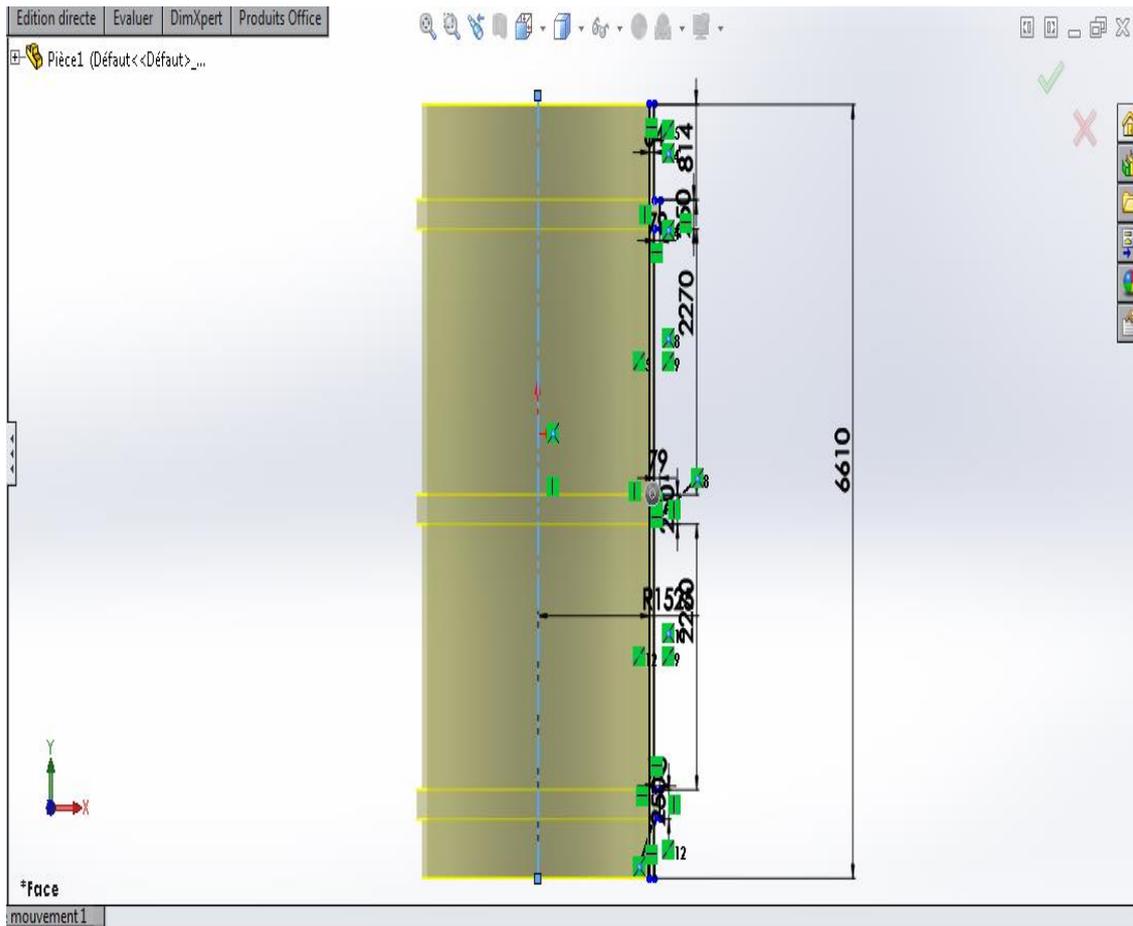


Figure III- 2 La création du dessin de la virole par les différents outils de SolidWorks

Pour modéliser la tubulure nous avons suivi les étapes suivantes :

- Nous avons tracé un axe de rotation et la forme de la tubulure avec toutes les cotations
- Nous avons utilisé la fonction de bossage avec rotation pour former la tubulure

Finalement, nous avons réalisé une esquisse pour l'évidement de la tubulure en utilisant la fonction d'enlèvement de matière avec rotation. Cela est illustré dans la **Figure III-2**

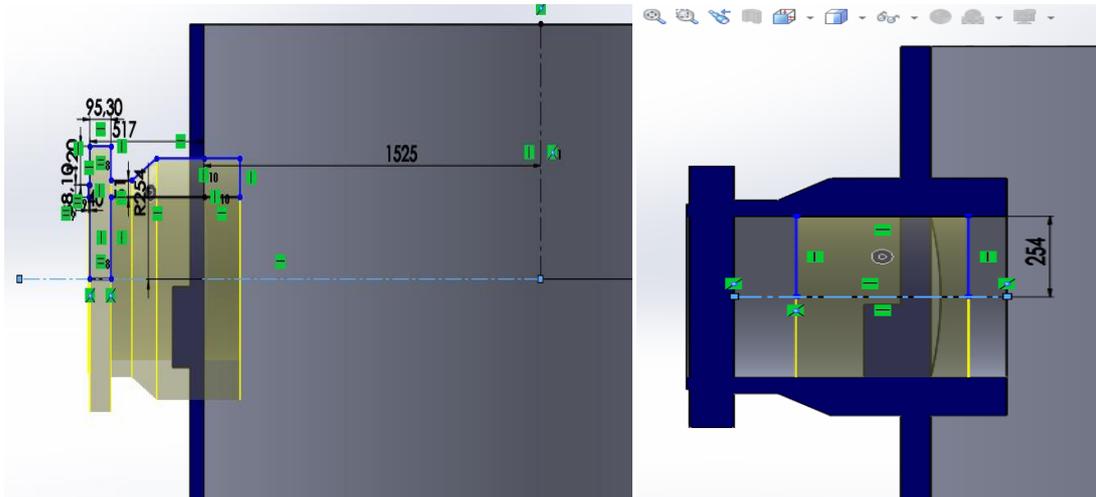


Figure III- 3 La création de la tubulure par la fonction d'enlève de matière avec rotation

Après ces étapes, nous avons obtenu la virole dans sa forme finale :

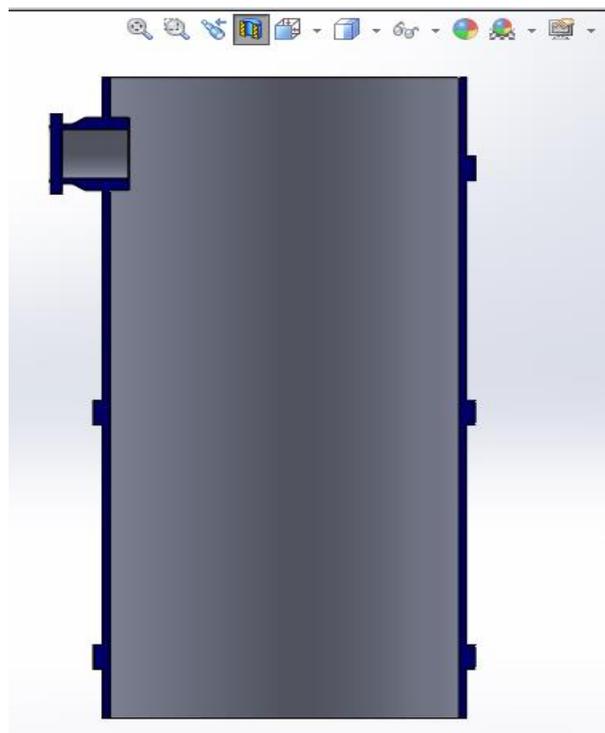


Figure III- 4 La forme finale de la virole

Pour les autres parties (la virole inférieure, la partie conique, et les fonds), nous avons suivi la même procédure en utilisant les mêmes fonctions (bossage avec rotation et enlèvement de matière avec rotation).

III.3 Modélisation de la colonne à fond elliptique (nouvelle 501E) :

Cette colonne est constituée de :

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

III.3.1 Modélisations des fonds de la colonne :

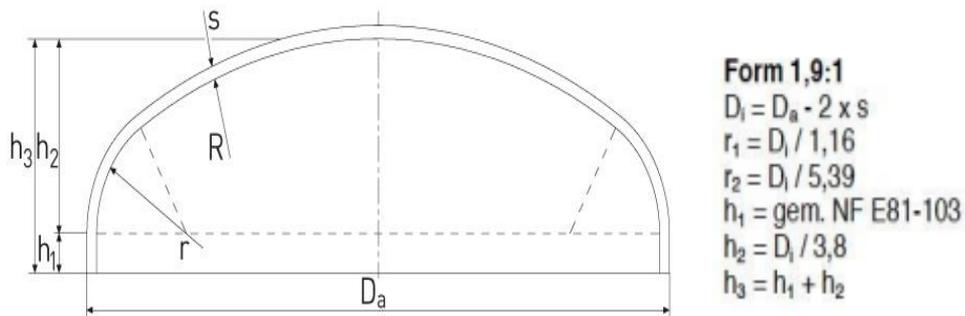


Figure III- 5 Dessin technique 2D du fond elliptique

III.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 :

$$r_1 = \frac{3050}{1.16}$$

$$r_1 = 2629.31 \text{ mm}$$

Et :

$$r_2 = \frac{3050}{5.39}$$

$$r_2 = 565.86 \text{ mm}$$

III.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 :

$$r_1 = \frac{1830}{1.16}$$

$$r_1 = 1577.58 \text{ mm}$$

Et :

$$r_2 = \frac{1830}{5.39}$$

$$r_2 = 339.51 \text{ mm}$$

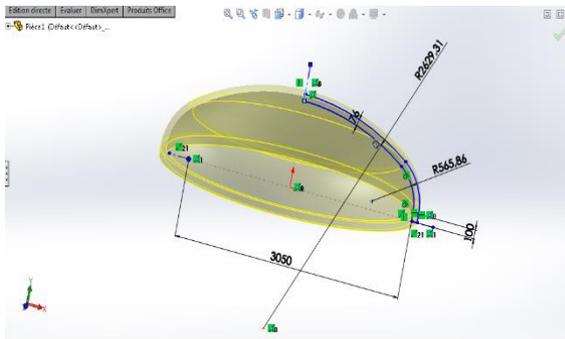


Figure III- 6 Modélisation du fond supérieur par SolidWorks

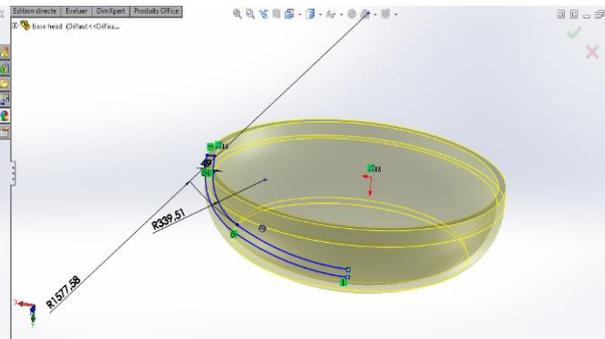


Figure III- 7 Modélisations du fond inférieur par SolidWorks

III.3.2 Modélisation des viroles de la colonne :

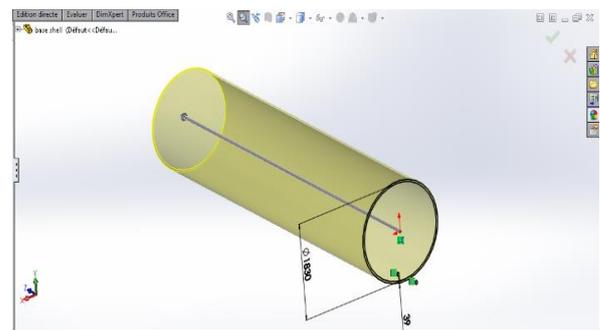
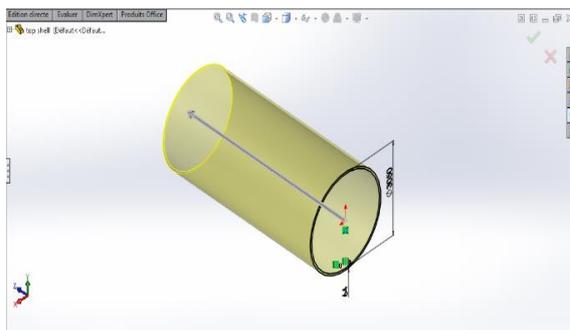


Figure III- 8 Modélisation de la virole supérieure et inférieure par SolidWorks

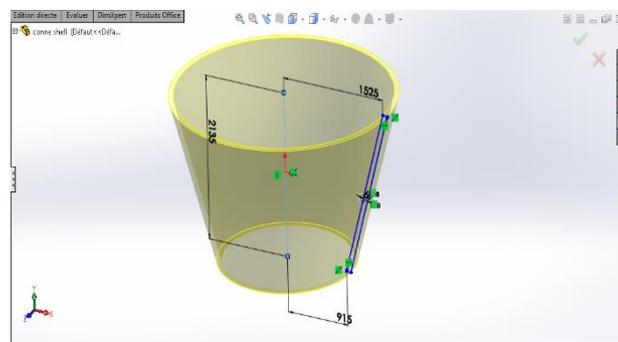


Figure III- 9 Modélisation de la virole conique par SolidWorks

III.3.3 Assemblage :

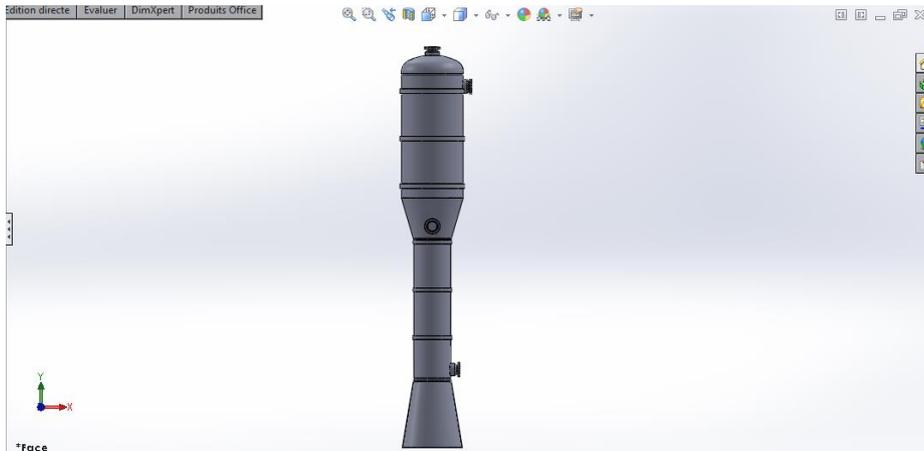


Figure III- 10 L'assemblage de la colonne à fond elliptique 1

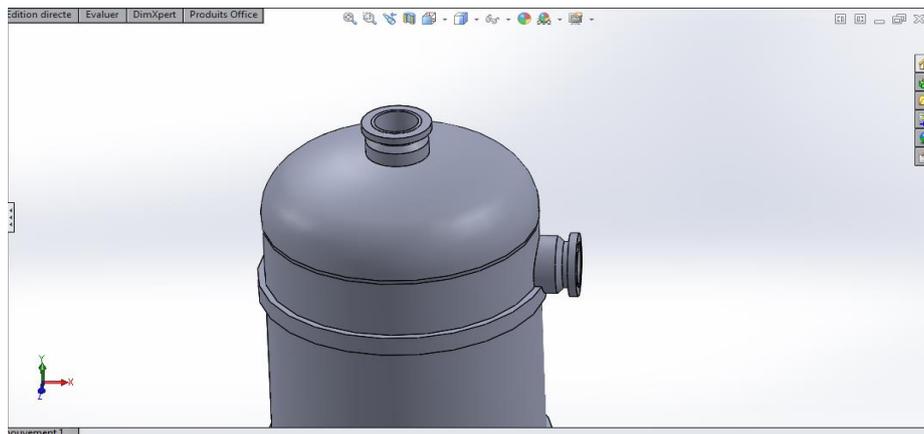


Figure III- 11 L'assemblage de la colonne à fond elliptique 2

III.4 Modélisation de la colonne avec différents fonds :

III.4.1 Modélisation de la colonne à fond hémisphérique :

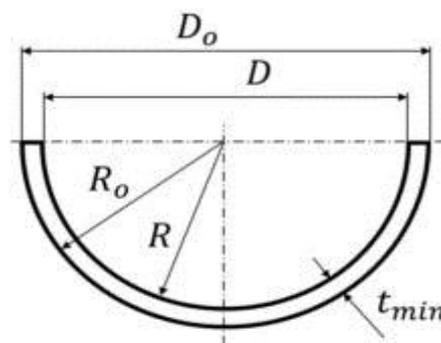


Figure III- 12 Dessin technique 2D du fond hémisphérique

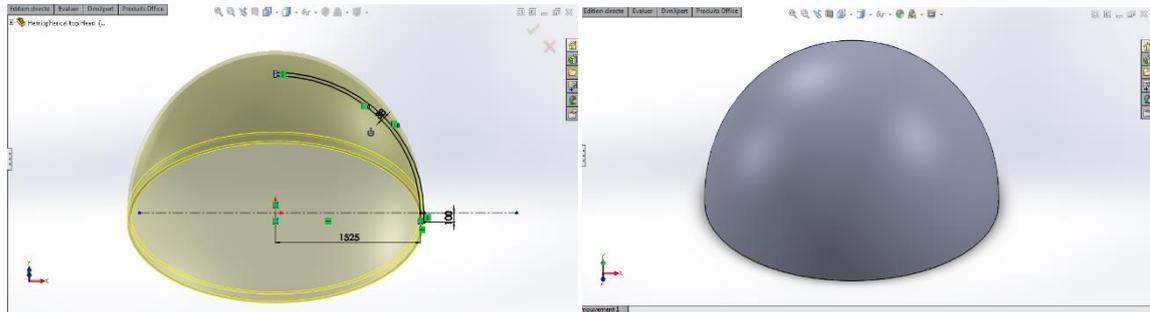


Figure III- 13 Modélisation du fond hémisphérique par SolidWorks

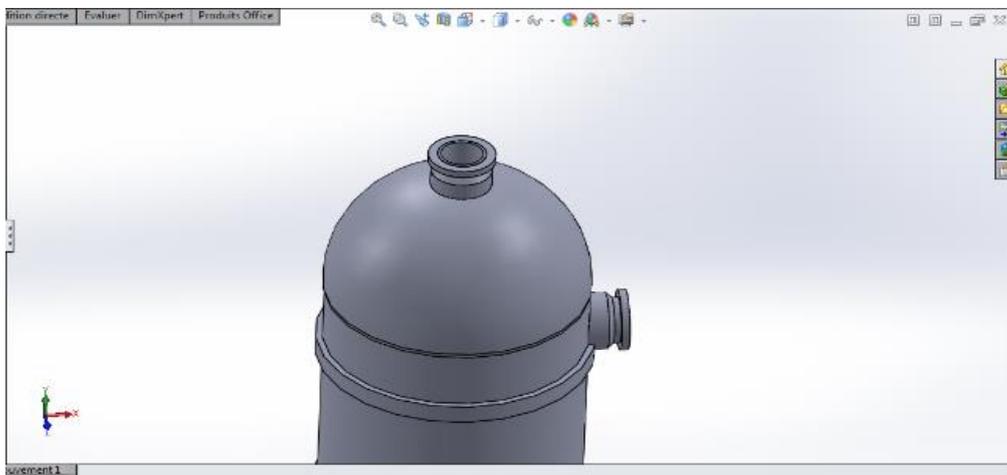


Figure III- 14 L'assemblage de la colonne à fond hémisphérique

III.4.2 Modélisation de la colonne à fond Tori-sphérique :

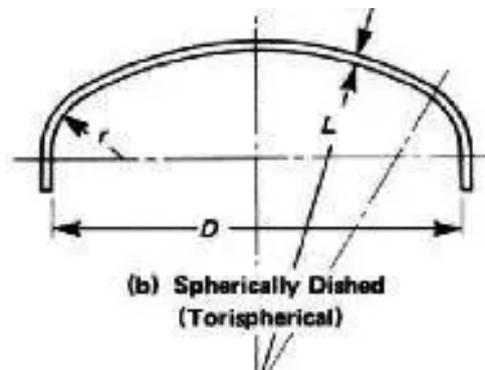


Figure III- 15 Dessin technique 2D du fond Tori sphérique

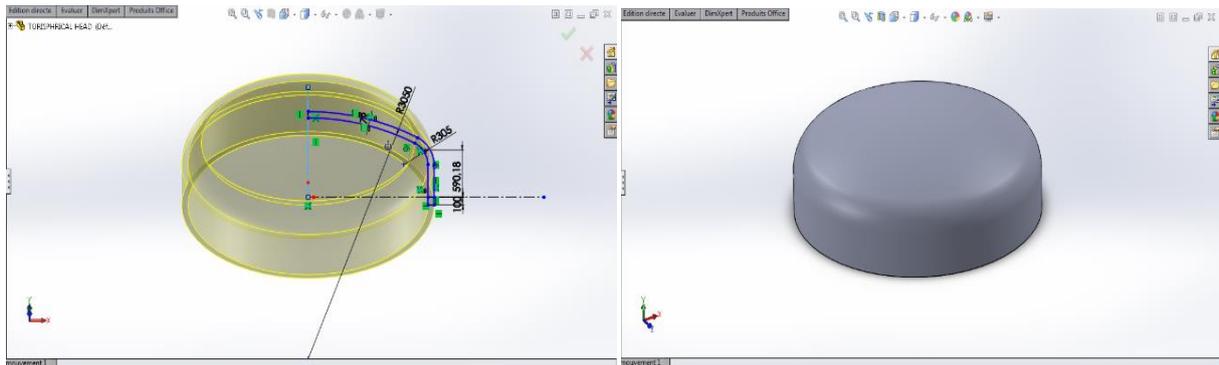


Figure III- 16 Modélisation du fond Tori sphérique par SolidWorks

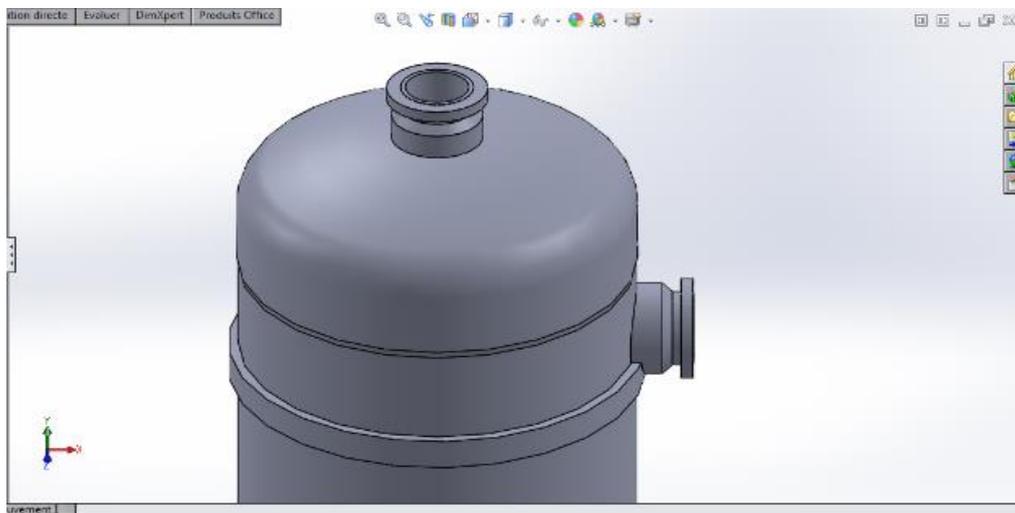


Figure III- 17 L'assemblage de la colonne à fond Tori sphérique

III.5 Les étapes de la simulation :

III.5.1 La première étape :

1. On ouvre ANSYS Workbench
2. On ouvre statique structural
3. On considère transiant thermal en parallèle avec static structural
4. On ouvre « engineering data » et en sélectionne le matériau l'acier inoxydable « Stainless steel »
5. En importe la géométrie et en ouvre le modèle

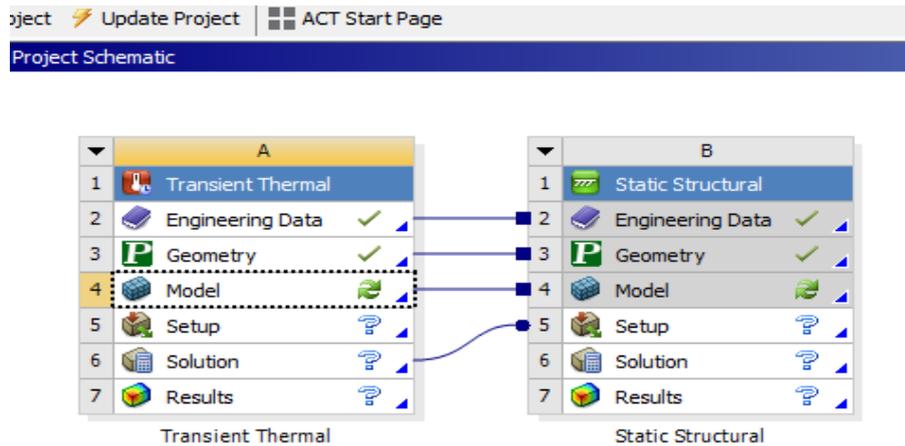


Figure III- 18 L'onglet d'ouverture des programmes static structural et transient thermal

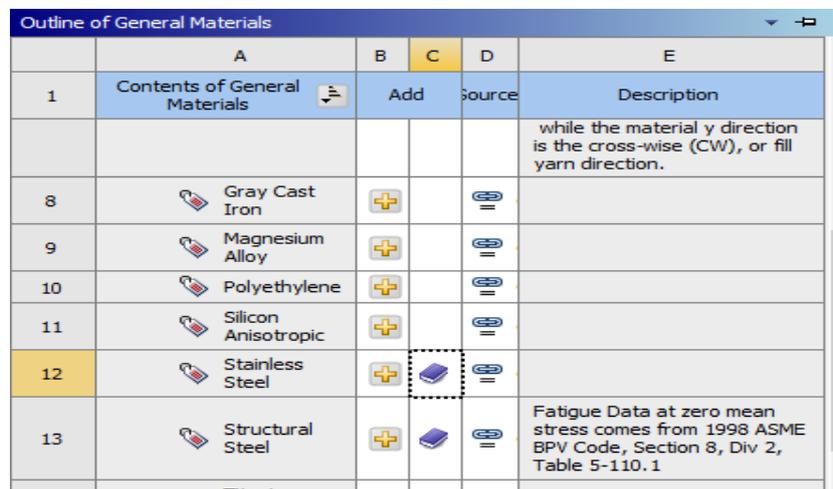


Figure III- 19 Le choix du matériau dans ANSYS Workbench

III.5.2 La deuxième étape :

Après l'ouverture du modèle on :

1. Génère le maillage avec un nombre des nœuds de 68488 (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)

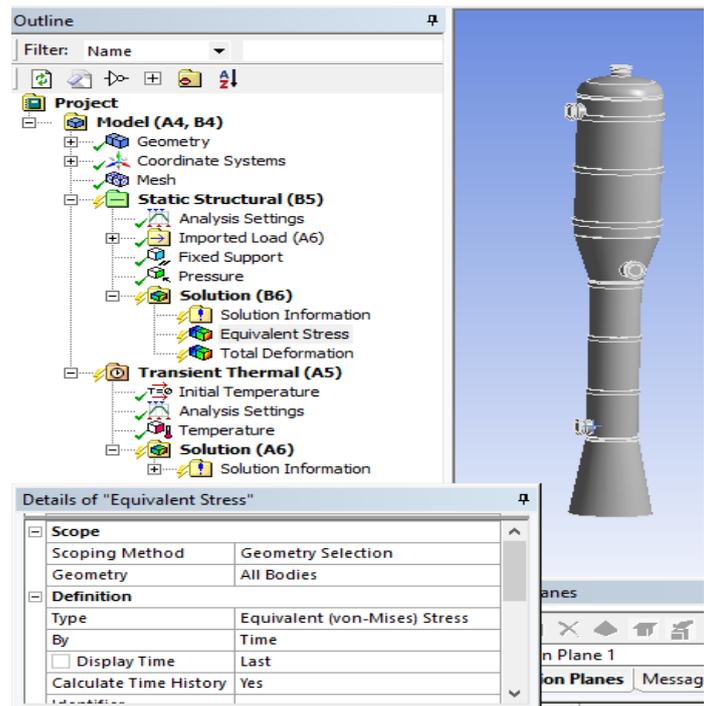


Figure III- 20 L'ajout des conditions : support fixe- pression-température

III.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)

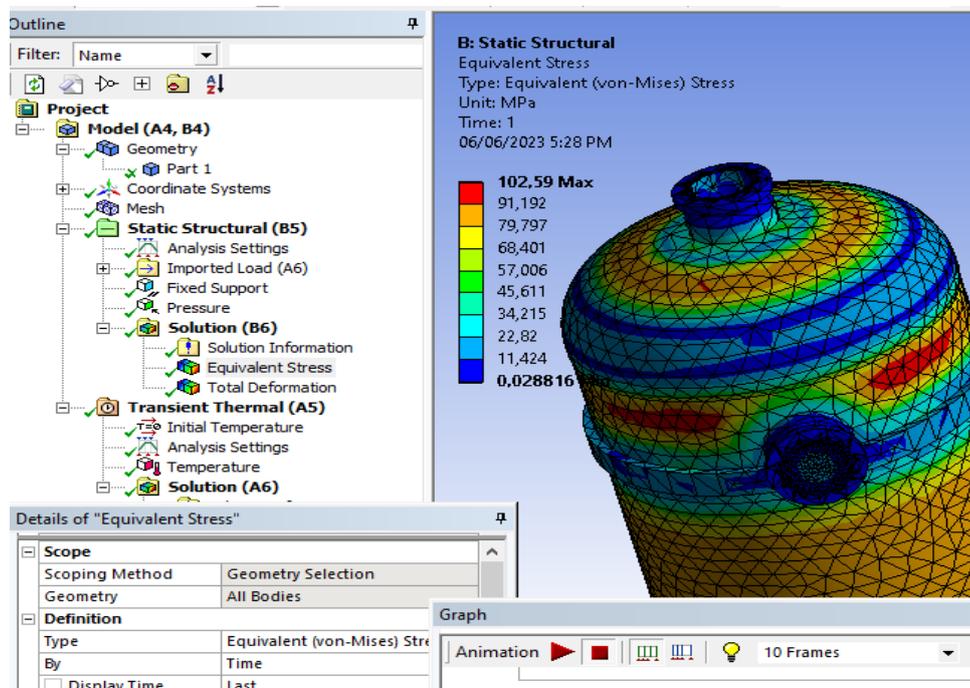


Figure III- 21 Les résultats de la simulation

III.5.4 Schématisation des étapes de simulation par le logiciel ANSYS 18.0 :

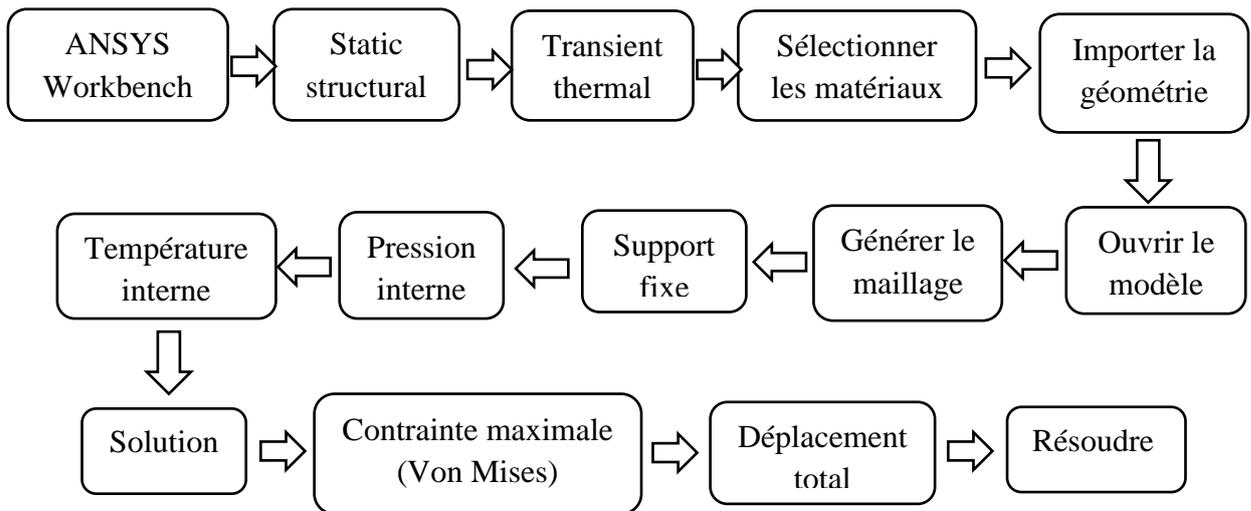


Figure III- 22 Un schéma qui montre les étapes de simulation par le logiciel ANSYS 18.0

III.6 Modèle d'intelligence artificiel (ANN) :

Nous sommes lancés dans le développement d'un code d'apprentissage automatique, un modèle de réseau neuronal artificiel (ANN), pour prédire les niveaux de stress dans notre colonne de distillation dans n'importe quelle condition (pression et température). Notre objectif est d'avoir une compréhension globale du comportement de la colonne à tout moment. Dans ce chapitre, nous présentons une brève description de notre modèle ANN, en soulignant son importance pour fournir des prévisions de contraintes précises. Grâce à ce modèle, on peut déterminer rapidement la contrainte dans la virole d'une colonne de distillation d'une manière précise sans passer par les étapes de calcul analytique ou de simulations numériques.

III.6.1 Présentation du code :

Nous allons discuter de la création, de la fonctionnalité et des résultats de notre modèle ANN pour la prédiction des contraintes dans les colonnes de distillation.

Étape 01 : Nous avons utilisé pour le codage Google Colaboratory pour réaliser le code

```
[15] import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
from sklearn.metrics import r2_score
from matplotlib.lines import Line2D
```

Figure III- 23 couche de bibliothèques utilisées

Nous importons les bibliothèques telles que pandas, matplotlib et les modules scikit-learn pour la manipulation des données, la visualisation et l'apprentissage automatique dans cette couche.

Étape 02: Après l'importation des données, nous avons les trois étapes suivantes

```
[5] # Split the data into features and target
X = data[['Temperature', 'Pressure']]
y = data['Stress']
```

```
[6] # Split the data into training and testing sets
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
```

```
[7] # Scale the features
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
```

Figure III- 24 couches de traitement des données

La première coche sépare l'ensemble de données en caractéristiques et en variables cibles, puis la deuxième cellule divise les données en données d'entraînement et de test (80 % pour les données d'apprentissage et 20 % pour les données de test). Enfin, la dernière cellule met à l'échelle les caractéristiques afin de normaliser les données.

Étape 03:

```
[ ] # Train the ANN model with updated hyperparameters
model = MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(110, 110), activation='relu', solver='adam',
                    learning_rate_init=0.1, alpha=0.001, batch_size=32, max_iter=1000, random_state=42)
model.fit(X_train_scaled, y_train)
```

```
MLPRegressor
MLPRegressor(alpha=0.001, batch_size=32, hidden_layer_sizes=(110, 110),
             learning_rate_init=0.1, max_iter=1000, random_state=42)
```

```
[ ] # Predict the target values for the training and testing data
y_train_pred = model.predict(X_train_scaled)
y_test_pred = model.predict(X_test_scaled)
y_pred = model.predict(X_test_scaled)
```

```
[ ] # Compute the R-squared score
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
print('R-squared score:', r2)
```

Figure III- 25 couches d'apprentissage du modèle RNA avec ses hyperparamètres et prédiction des valeurs cibles pour les données de test et d'apprentissage

Dans la première couche, nous avons choisi notre modèle **RNA (MLPRegressor)** et ses **hyperparamètres**. Les valeurs cibles pour les données d'apprentissage et de test sont prédites

par la deuxième couche. Le score R-squared est calculé dans la troisième couche pour évaluer la performance du modèle ainsi que de mesurer la précision du modèle.

Étape 04:

```
[12] # Predict the target values for new data
new_data = pd.DataFrame({'Temperature': [22, -30, -45, -2, -9, -10, -17, -6, -62, -50, -22, 15, 30, 20, -32, -60, -23],
                        'Pressure': [5, 10, 5, 2, 6, 5, 8, 5, 4, 5, 7, 5, 3, 5, 1, 5, 9]})
new_data_scaled = scaler.transform(new_data)
predicted_values = model.predict(new_data_scaled)

# Print predicted values and their verification status
print('\n\nPredicted values:\n\n')
for value in predicted_values:
    verification_status = '\n\nVerified\n\n' if value <= 205.5 else '\n\nNot Verified\n\n'
    print('\n\n{:0.2f}\n\n - {}'.format(value, verification_status))
```

Figure III- 26 couche de prédiction des valeurs cibles pour des Nouvelles données

Cette cellule prédit les valeurs cibles pour les nouveaux points de données sur la base de ce que le modèle a appris. Les valeurs prédites sont affichées et le code classe les résultats comme 'verified' ou 'not-verified' en fonction d'un seuil, ce qui permet une classification claire des valeurs prédites.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction :

Ce chapitre a pour but de présenter, d'analyser et de discuter les résultats obtenus par les simulations, en considérant trois types des fonds des colonnes. Avant de commencer de présenter et de discuter les résultats obtenus, quelques scénarios ont été considérés pour comparer les résultats numériques avec la solution analytique pour valider l'approche numérique.

IV.2 Le choix du maillage :

Pour choisir un maillage approprié pour notre colonne nous avons varié le nombre des éléments en observant la variation de la contrainte maximale ; lorsque le changement du nombre d'éléments n'influe pas sur la variation des résultats, dans ce cas on conclut que ce nombre d'éléments est le nombre optimal.

Pour effectuer cela nous a considéré une pression fixe en variant le nombre d'éléments plusieurs fois avec l'observation de la variation des résultats de la simulation (contrainte).

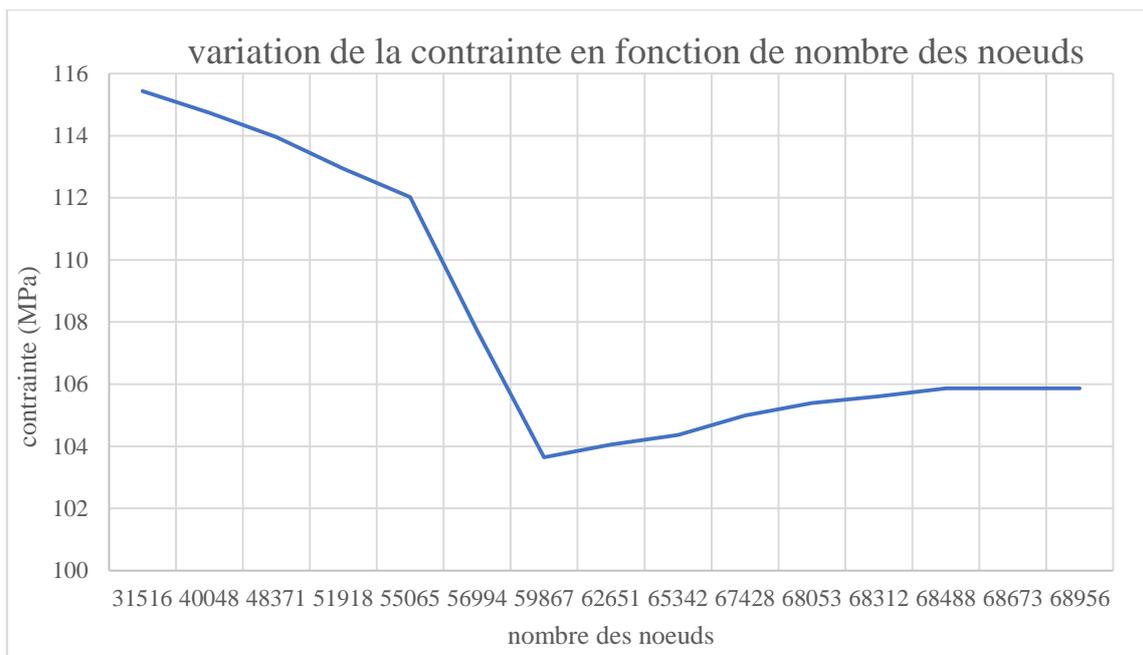
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV- 1 le choix optimal de maillage

Pression (MPa)	Nombre d'éléments	Nombre des nœuds	Contrainte (MPa)
3,8	31516	61942	115,43
	40048	78211	114,74
	48371	93590	113,95
	51918	100120	112,94
	55065	105617	112,02
	56994	109170	107,73
	59867	113965	103,65
	62651	117243	104,06
	65342	120034	104,37
	67428	125844	104,99
	68053	126497	105,39
	68312	126993	105,61
	68488	127306	105,87
	68673	127753	105,87
	68956	128372	105,87

Les résultats de ce tableau nous à permet d'avoir le graphe suivant :

Figure IV- 1 graphe du choix optimale de maillage



Les résultats du tableau IV-1 et ce graphe IV-1 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 :

Tableau IV- 2 les propriétés de maillage

Details of "Mesh"	
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	80,8410 mm
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	127306
<input type="checkbox"/> Elements	68488

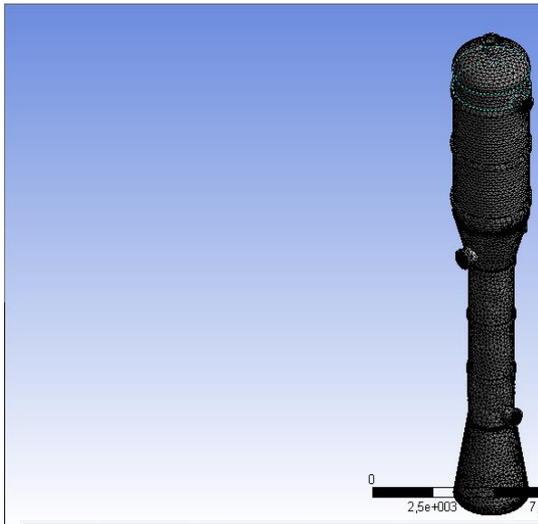


Figure IV- 2 Propriétés de maillage

Nombre des nœuds	127306
Nombre des éléments	68488
Fonction de taille	Adaptative
Résolution	Fine
Taille d'élément minimale	80,84 mm

Figure IV- 3 Maillage de la colonne à fond elliptique

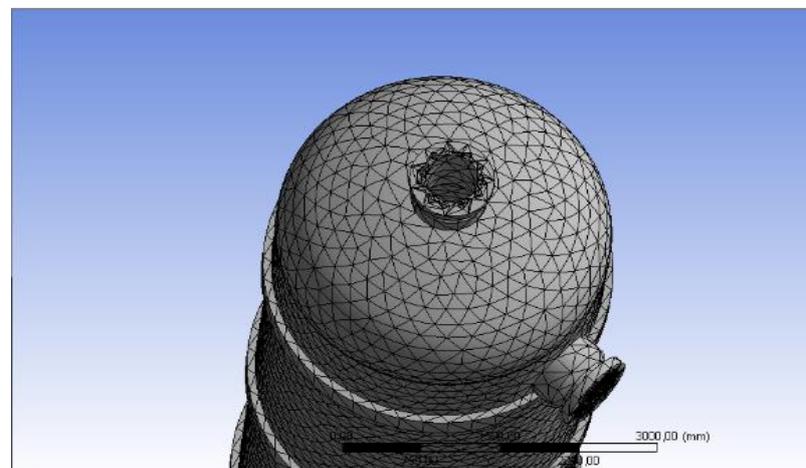


Figure IV- 4 maillage du fond elliptique

IV.3 Evaluation de la contrainte circonférentielle par simulation :

Avec le programme de simulation ANSYS 18.0 Workbench nous avons utilisé l'analyse structurelle statique pour la colonne, ce qui signifie que le corps est dans un état rigide fixé en un point et que la charge donnée est très lente.

Pour déterminer la contrainte circonférentielle on applique une coupe dans les différentes sections de la colonne selon l'axe "Z" après on introduit une pression interne pour voir les résultats de la contrainte maximale résultante dans chaque partie de la colonne.

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

IV.3.1.1 fond supérieur :

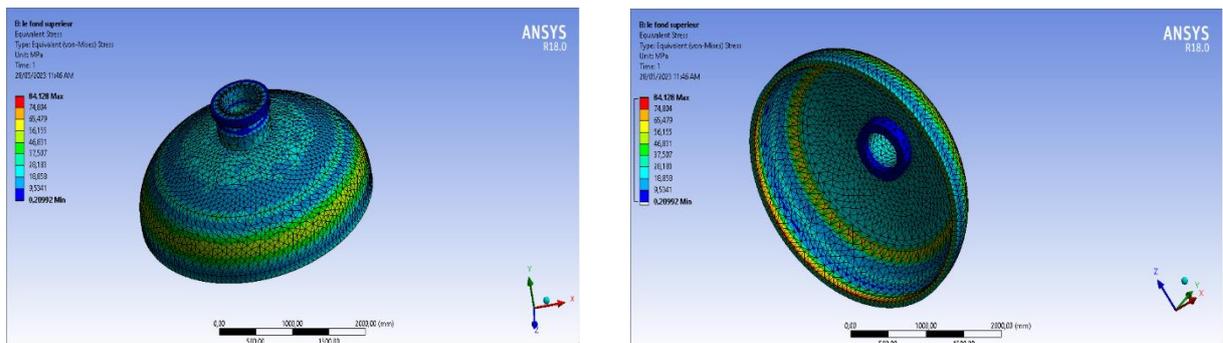


Figure IV- 5 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond supérieur

On peut voir que la valeur de la contrainte varie entre 0,20992 MPa et 84,128 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 présente sur ces extrémités une contrainte maximale de 84,128 MPa.

IV.3.1.2 virole supérieure :

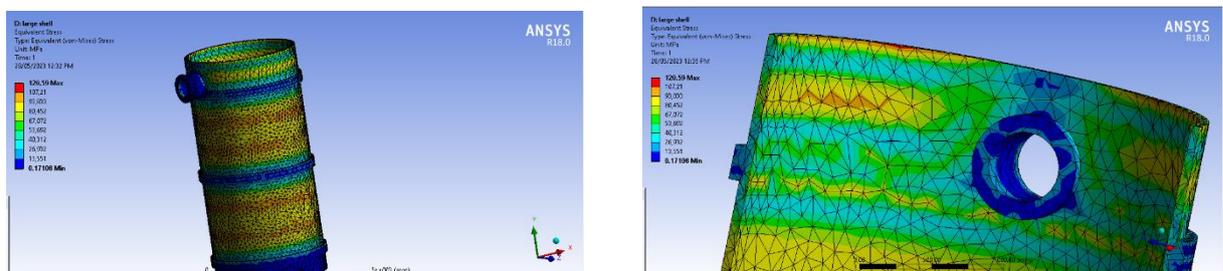


Figure IV- 6 contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole supérieure

On voit que la contrainte varie entre 0,17 MPa et 120,59 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 120,59 MPa.

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

IV.3.1.3 virole conique :

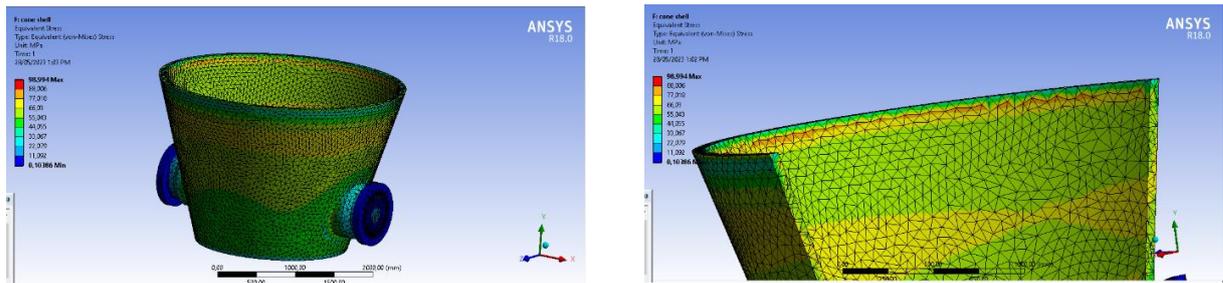


Figure IV- 7 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole conique

On voit que la contrainte est comprise entre 0,107 MPa et 119,99 MPa, où elle est distribuée sur les parois interne et externes de la virole. Cette virole présente des résultats similaires à celles de la virole supérieure parce qu'ils ont un même épaisseur.

IV.3.1.4 virole inférieure :

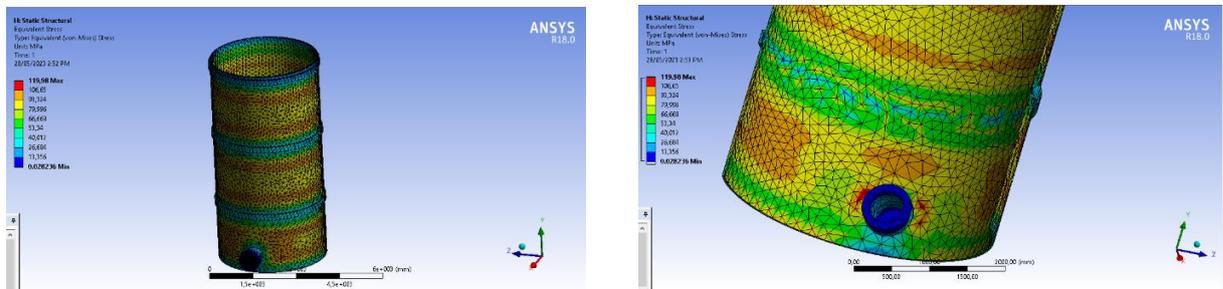


Figure IV- 8 contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la virole inférieure

La contrainte varie entre 0,02 MPa et 119,98 MPa, elle est distribuée sur les parois de la colonne et présente une valeur maximale de 119,98 MPa proche de la tubulure grâce au changement de l'épaisseur et sur la surface de contact avec le fond inférieur.

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

IV.3.1.5 fond inférieur:

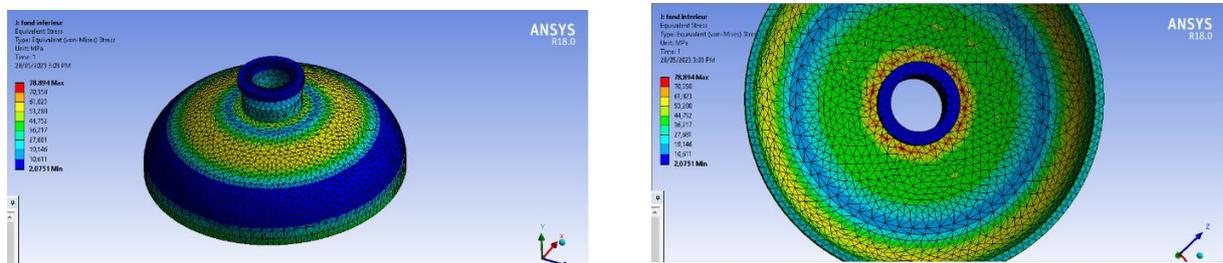


Figure IV- 9 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur du fond inférieur

Dans ce cas la contrainte est dans la fourchette de 2,07 MPa et 78,894 MPa, elle est distribuée sur les parois du fond et présente une valeur maximale de 78,894 MPa à la proximité de la tubulure.

Nous constatons que la contrainte se répartit sur toute la paroi de la colonne, mais elle est plus concentrée à proximité des tubulures et des joints de soudure. Ces zones sont donc considérées comme des zones de concentration de contrainte.

IV.3.1.6 L'essai hydrostatique :

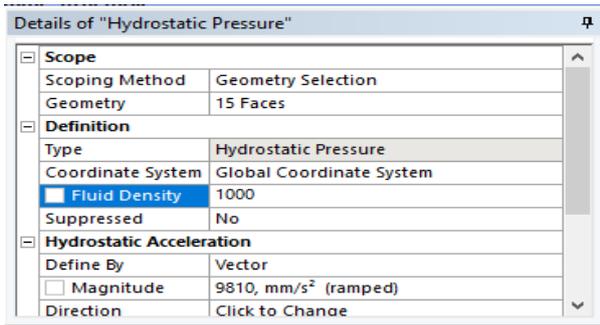


Figure IV- 11 Conditions de l'essai hydrostatique

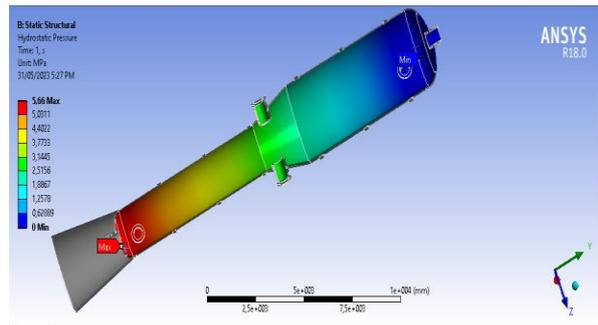


Figure IV- 10 pression hydrostatique appliquée sur l'intérieur de la colonne

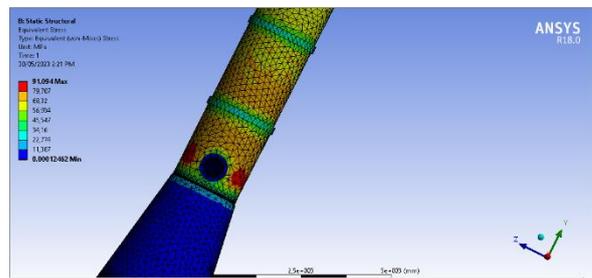
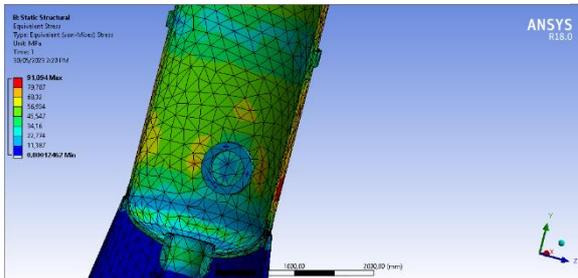


Figure IV- 12 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne

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 MPa et 91,094 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 concentrée dans la virole inférieure à la proximité de la tubulure.

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 IV- 3 les résultats de la simulation

La pièce de la colonne	La contrainte maximale obtenue par simulation
Le fond supérieur	84,128
La virole supérieur	120,9
La virole conique	98,994
La virole inférieur	119,98
Le fond inférieur	78,894
L'essai hydrostatique	91,094

IV.3.2 Interprétation :

Selon l'équation défini dans le deuxième chapitre, la contrainte circonférentielle est reliée à la pression, le diamètre et sur tout l'épaisseur de la paroi.

Selon les résultats de la simulation, on remarque que la valeur de la contrainte augmente proportionnellement avec la diminution de l'épaisseur, où elle diminue avec la diminution du diamètre de chaque partie de la colonne.

Le fond inférieur peut résister aux contraintes induites par l'essai hydrostatique et la valeur de la contrainte maximale et inférieure à la limite élastique.

Tous les résultats obtenus des contraintes dans les différentes parties de la colonne sont inférieurs à la limite élastique ce que signifie que les résultats sont acceptables.

IV.3.3 Validation des résultats :

Le tableau suivant **IV-4** représente les résultats des simulations et les résultats analytiques de la contrainte maximale réagi sur les parois dans les différentes parties de la colonne ainsi que le résultat de l'essai hydrostatique pour les comparer et déterminer le pourcentage d'erreur entre les deux types des résultats afin de valider l'approche numérique dans notre travail :

Les pièces du colonne	La contrainte membranaire		L'erreur
	Analytique (MPa)	Simulation (MPa)	
Le fond supérieur	84,07	84,128	0,07 %
La virole supérieur	118,18	120,9	2,30 %
La virole conique	96,87	98,994	2,19 %
La virole inférieur	116,36	119,98	3,11 %
Le fond inférieur	77,60	78,894	1,66 %
L'essai hydrostatique	88,52	91,094	2,9 %

Tableau IV- 4 comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations

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

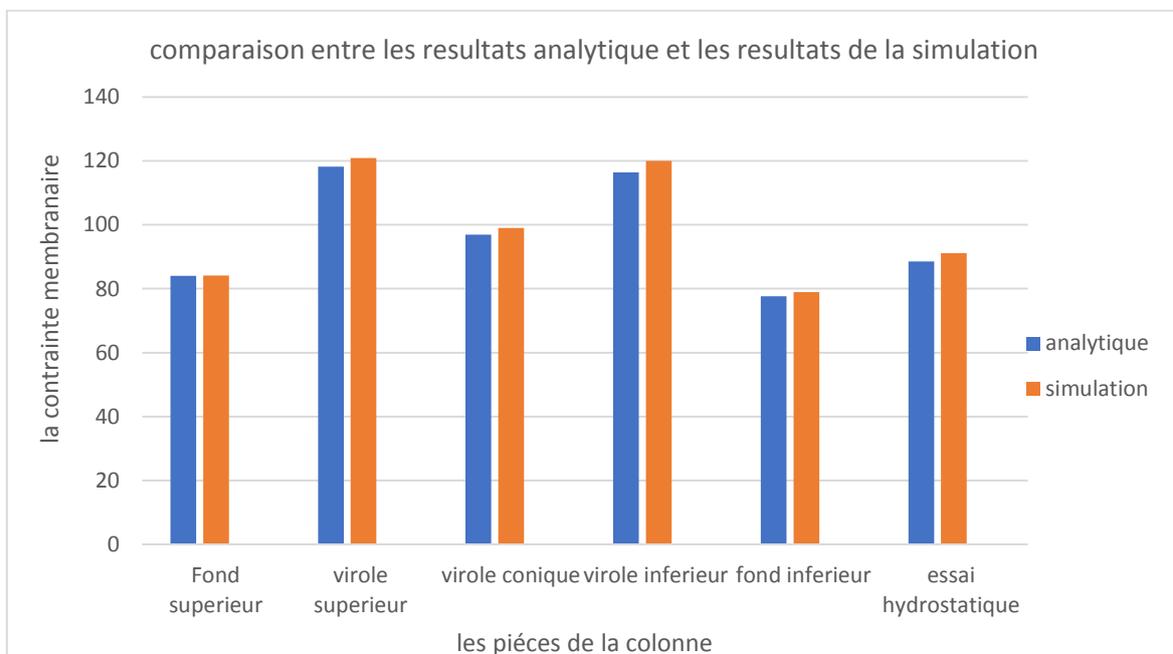


Figure IV- 13 Diagramme de comparaison entre les résultats analytiques et les résultats des simulations

Le diagramme précédent **IV-13** explique clairement les valeurs obtenues. Comme on le voit, les valeurs des contraintes maximales sont proches les unes des autres avec des valeurs d'erreur négligeables. Ces pourcentages sont acceptables et valident le modèle numérique.

IV.4 Simulation et interprétation des résultats :

Pour évaluer l'effet de changement des conditions opératoires et le type du fond de la colonne, plusieurs simulations ont été considérées avec le changement des conditions opératoires (température, pression) ainsi le type du fond, ce qui nous permis d'avoir des résultats plus adaptables.

IV.4.1 En absence de la température :

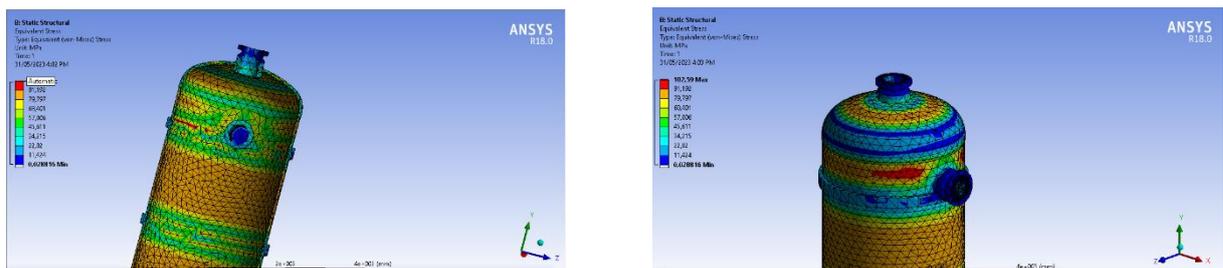
IV.4.1.1 La colonne à fond elliptique :

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

Pression (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déplacement total (mm)
4,96	134,89	1,1747
3,8	102,59	0,89343
2,64	70,299	0,61219

IV.4.1.1.1 contrainte maximale :

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



IV.4.1.1.2 déplacement total :

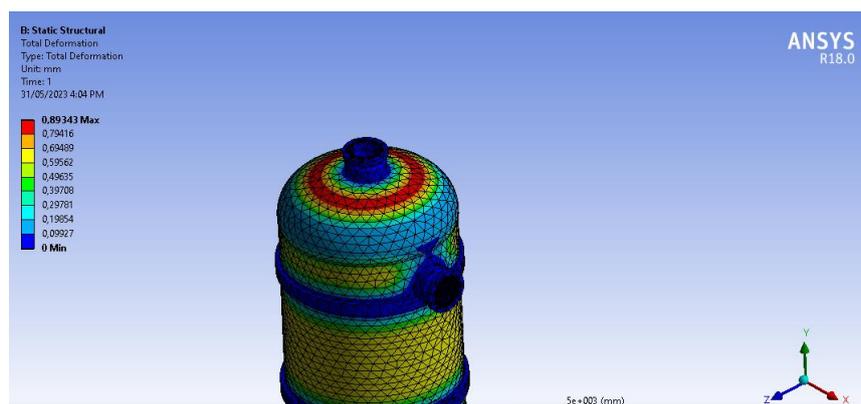


Figure IV- 15 déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en absence de la température

D'après le **tableau IV-5** et les **figures IV-14, IV-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 tubulure sur la paroi de la virole supérieure avec une valeur de 102,59 MPa lors de l'application d'une pression interne de 3,8 MPa.

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

IV.4.1.2 La colonne à fond hémisphérique :

Tableau IV- 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)
4.96	132.2	0.94603
3.8	100.63	0.71696
2.64	69.068	0.48785

IV.4.1.2.1 contrainte maximale :

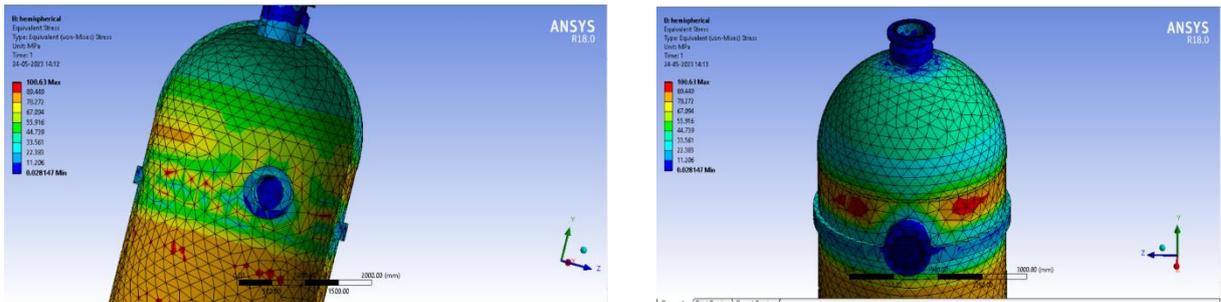


Figure IV- 16 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond hémisphérique en absence de la température

IV.4.1.2.2 déplacement total :

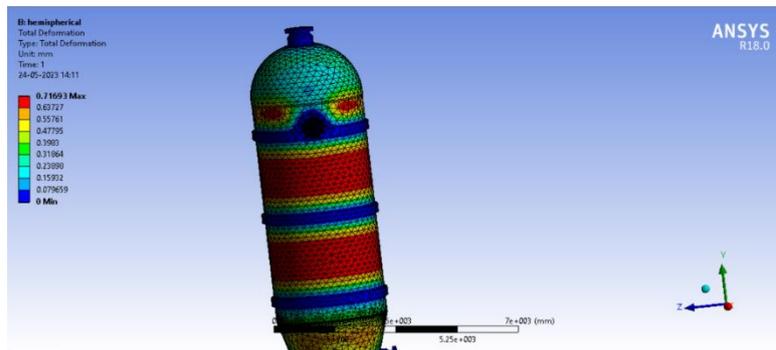


Figure IV- 17 déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en absence de la température

D'après le **tableau IV-6** et les **figures IV-16, IV-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 supérieure avec une valeur de 100,63 MPa lorsqu'on a une pression interne de 3,8 MPa.

Le déplacement total n'a pas affecté complètement le fond hémisphérique, il est concentré sur la virole dans les surfaces entre les anneaux de renfort.

IV.4.1.3 La colonne à fond Tori sphérique :

Tableau IV- 7 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)
4.96	186.70	1.7494
3.8	143.15	1.3336
2.64	99.609	0.91769

IV.4.1.3.1 contrainte maximale :

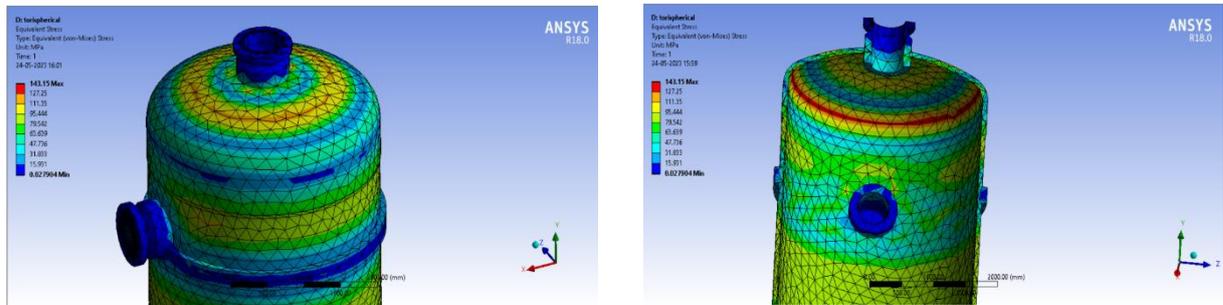


Figure IV- 18 Contrainte maximale à l'intérieur et l'extérieur de la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température

IV.4.1.3.2 déplacement total :

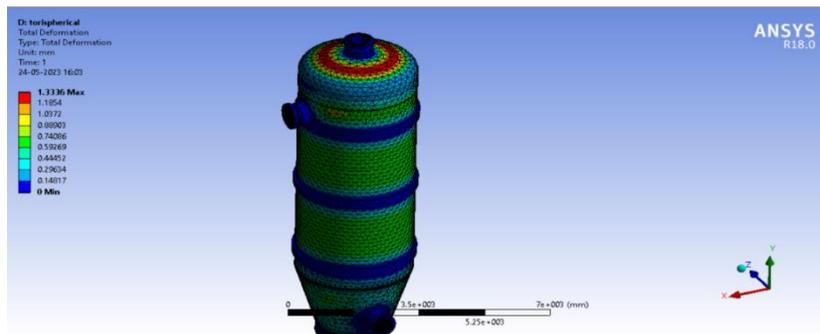


Figure IV- 19 déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en absence de la température

D'après le **tableau IV-7** et les **figures IV-18, IV-19** en voie que les valeurs de la contrainte maximale et le déplacement total augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la pression.

La contrainte maximale est concentrée sur le rayon de jointure du fond Tori-sphérique avec une valeur maximale de 143,15 MPa lorsqu'on a appliqué une pression interne de 3,8 MPa.

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

IV.4.1.4 Interprétation :

D'après les tableaux précédent on peut tracé un graphe pour comparer les résultats :

IV.4.1.4.1 contrainte maximale :

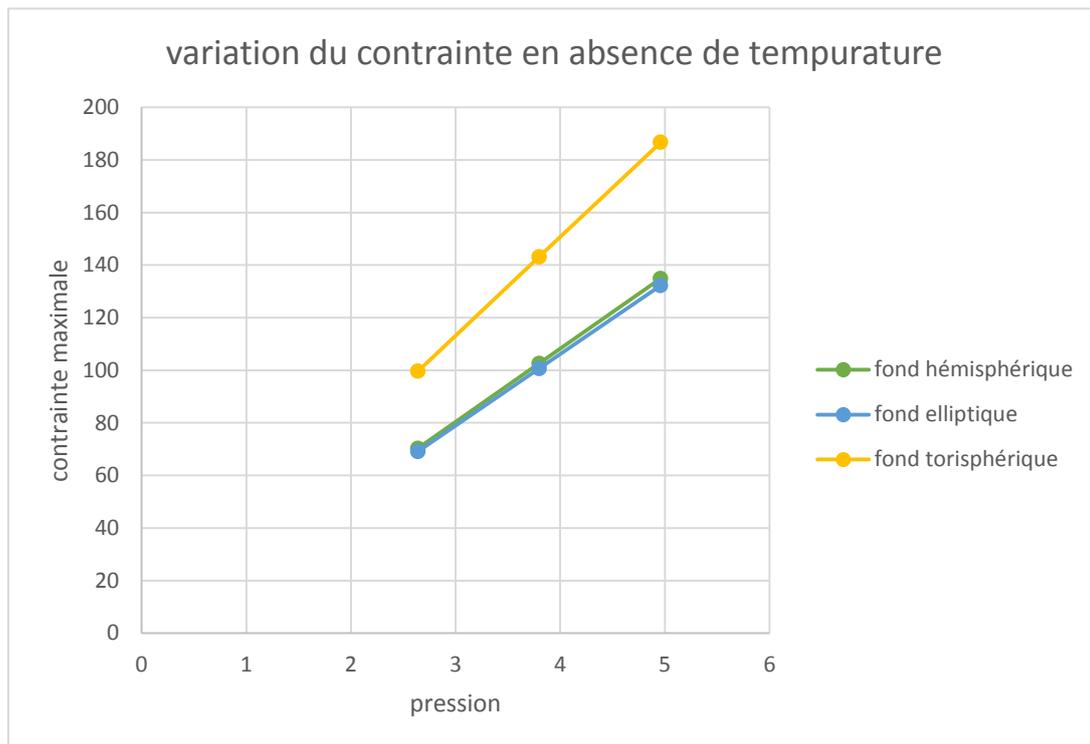


Figure IV- 20 variation de contrainte en absence de temperature

Ce graphe **IV-20** 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 hémisphérique et elliptique.

Les courbes des fonds hémisphérique et elliptique représentent des valeurs similaires dans les basses pression (moins de 3,8MPa) mais celles du fond elliptique sont faibles légèrement par rapport aux celles du fond hémisphérique.

La courbe du fond elliptique représente des valeurs de contrainte maximale plus faibles que celles de la courbe du fond hémisphérique dans les fortes pression (plus de 3,8MPa).

IV.4.1.4.2 déplacement total :

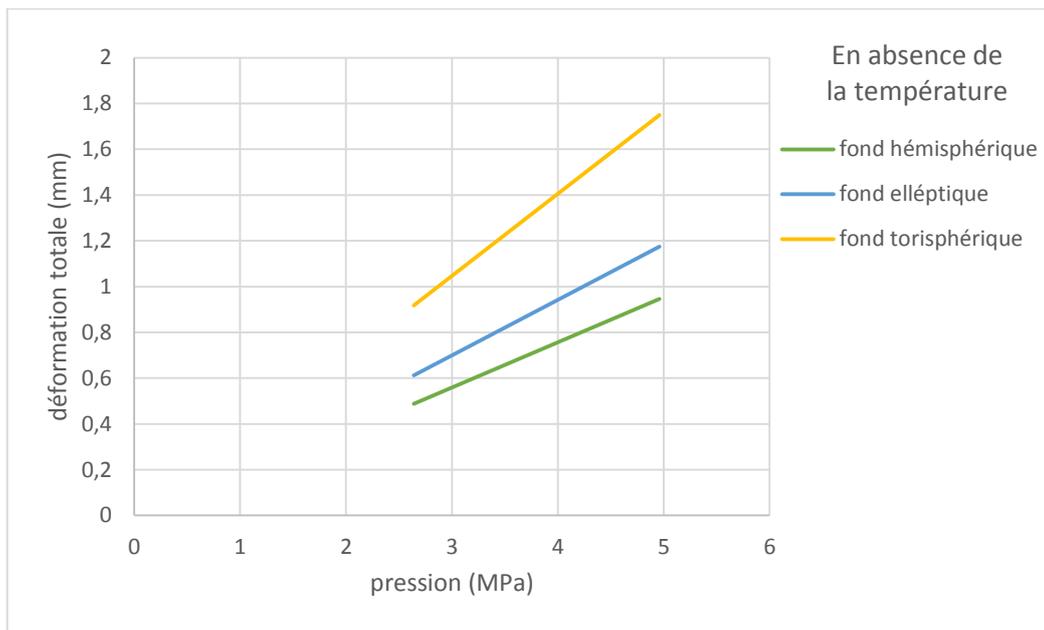


Figure IV- 21 variation de déplacement totale en absence de température

Ce graphe **IV-21** 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 suivi par la courbe du fond elliptique après la courbe du fond Tori sphérique ce qui signifie que le fond hémisphérique offre une plus grande stabilité et une moindre déformation en changement de la pression.

IV.4.2 En présence de la température :

IV.4.2.1 La colonne à fond elliptique :

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

Température(°C)	Pression (MPa)	Contrainte (MPa)	Déplacement(m m)
-10	4,96	138,19	1,2027
	3,8	105,87	0,85694
	2,64	73,55	0,64013
-20	4,96	152,17	1,1715
	3,8	120,06	0,89026
	2,64	88,12	0,60901
-30	4,96	167,46	1,1404

	3,8	144,41	0,85992
	2,64	122,19	0,58052
	4,96	195,23	1,1172
-38	3,8	173,05	0,83777
	2,64	151,43	0,55484

IV.4.2.1.1 La contrainte maximale :

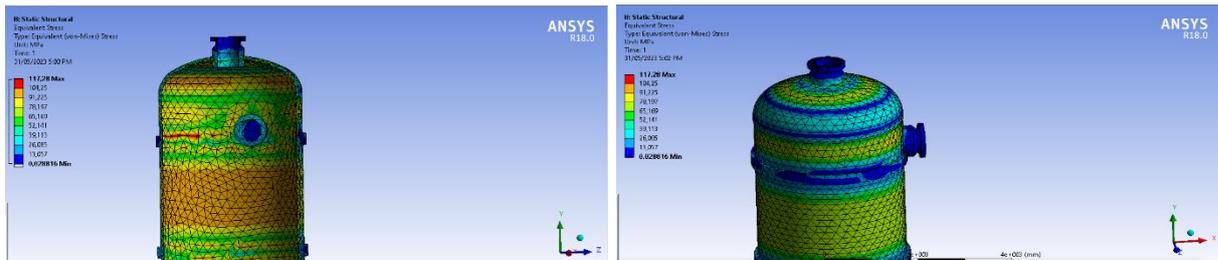


Figure IV- 22 contrainte maximale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température

IV.4.2.1.2 déplacement total :

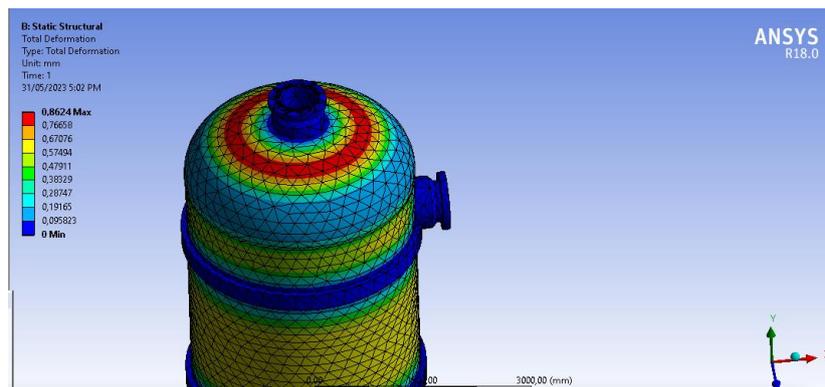


Figure IV- 23 déplacement totale dans la colonne à fond elliptique en présence de la température

D'après le **tableau IV-8** et les **figures IV-22, IV-23** il est clair que les valeurs de la contrainte maximale augmentent proportionnellement avec la diminution de la température tandis que les valeurs de déplacement total diminuent proportionnellement avec la diminution de la température.

La contrainte maximale est localisée sur la paroi de la virole supérieure loin du joint de soudure et proche de la tubulure.

Le déplacement total est concentré sur la paroi du fond supérieur de la colonne avec une valeur très acceptable (moins de 1mm).

IV.4.2.2 colonne à fond hémisphérique :

Tableau IV- 9 Variation de la contrainte et de déplacement dans une colonne à fond hémisphérique en présence de température

Température	Pression (MPa)	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)
-10	4.96	135.07	0.97966
	3.8	103.48	0.75054
	2.64	71.893	0.52143
-20	4.96	155.1	0.93598
	3.8	124.27	0.70688
	2.64	93.673	0.47779
-30	4.96	178.97	0.89238
	3.8	148.83	0.66332
	2.64	119.24	0.43528
-38	4.96	199.10	0.85756
	3.8	169.55	0.62972
	2.64	140.72	0.40573

IV.4.2.2.1 contrainte maximale :

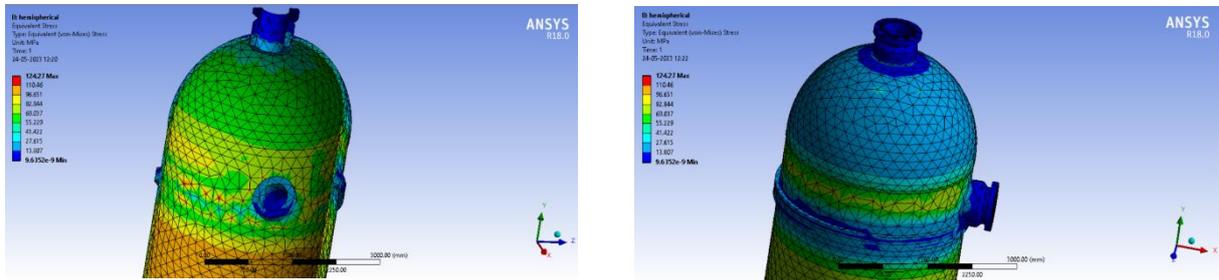


Figure IV- 24 contrainte maximale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température

IV.4.2.2.2 déplacement total :

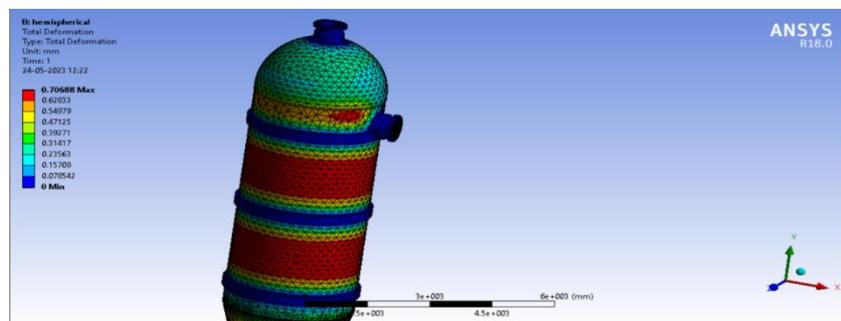


Figure IV- 25 déplacement totale dans la colonne à fond hémisphérique en présence de la température

D’après le tableau IV-9 et les figures IV-24 et IV-25 on peut observer que la valeur de la contrainte maximale augmente proportionnellement avec la diminution de la température tandis que la valeur de déplacement total diminue proportionnellement avec la diminution de la température.

La contrainte maximale se trouve sur la paroi de la virole supérieure loin du joint de soudure et proche de la tubulure, le fond hémisphérique n’a aucune concentration maximale de la contrainte.

Le fond hémisphérique ne présente aucun déplacement total maximale, le déplacement est concentré sur la paroi de la virole loin du joint de soudure et dans les surfaces entre les anneaux de renfort avec des valeurs très acceptables (moins de 1 mm).

IV.4.2.3 La colonne à fond Tori-sphérique :

Tableau IV- 10 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 (mm)
-10	4.96	186.19	1.7788
	3.8	142.64	1.3628
	2.64	99.099	0.94677
-20	4.96	198.55	1.746
	3.8	155.2	1.33
	2.64	111.94	0.91403
-30	4.96	211.98	1.7133
	3.8	168.92	1.2975
	2.64	126.12	0.88359
-38	4.96	223.16	1.6881
	3.8	180.39	1.2741
	2.64	142.2	0.86028

IV.4.2.3.1 La contrainte maximale :

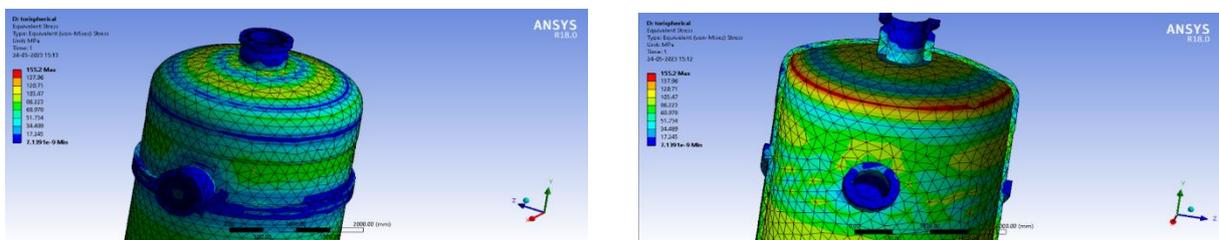


Figure IV- 26 contrainte maximale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température

IV.4.2.3.2 Le déplacement total :

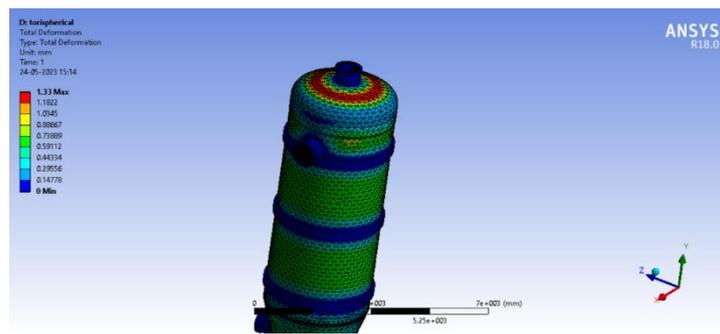


Figure IV- 27 déplacement totale dans la colonne à fond Tori-sphérique en présence de la température

D’après le **tableau IV-10** et les **figures IV-26 et IV-27** on observe que la valeur de la contrainte maximale augmente proportionnellement avec la diminution de la température tandis que le déplacement total diminue proportionnellement avec la diminution de la température.

La contrainte maximale est localisée sur le rayon de jointure du fond Tori-sphérique avec une valeur maximale plus de 155MPa lorsqu’on applique une pression interne de 3,8 MPa.

Le déplacement total est concentré sur le fond supérieur de la colonne avec une valeur maximale de 1,33 mm qui est une valeur acceptable.

IV.4.2.4 Interprétation des résultats :

IV.4.2.4.1 La contrainte maximale :

A. Pour une pression de 4,96 MPa:

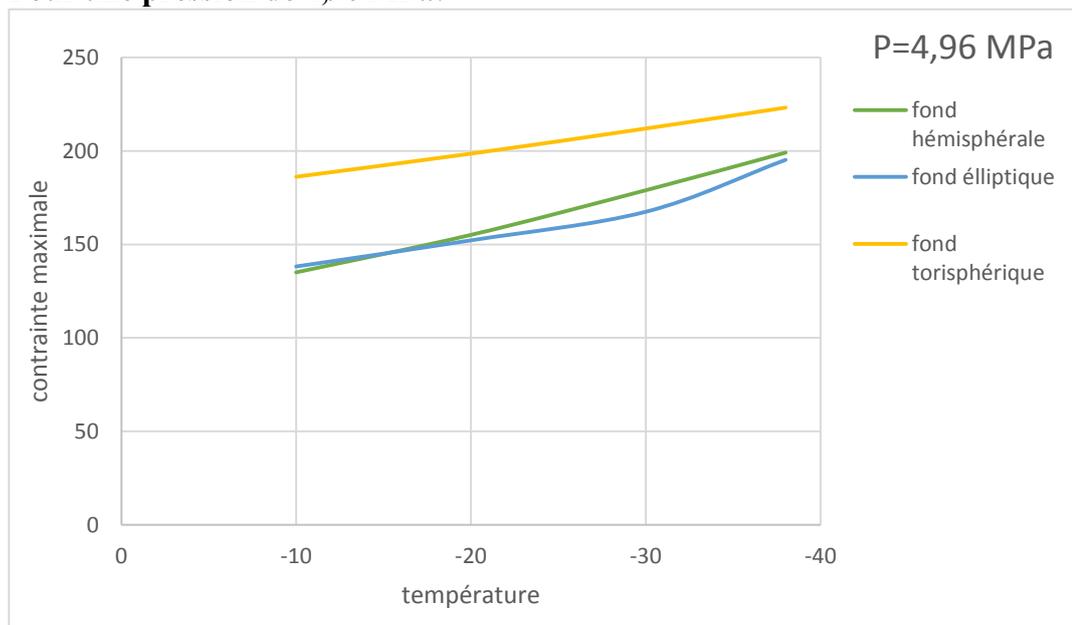


Figure IV- 28 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à P=4,96MPa

Ce **graphe IV-28** représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante $P=4,96$ MPa ; il est clair qu'on peut deviner les résultats en deux plages :

1. De -10 à -15 °C :

Les courbes du fond hémisphérique et du fond elliptique montrent des valeurs de contrainte maximale similaires et légèrement différentes que la contrainte maximale présentée par le fond hémisphérique est légèrement faible que celle du fond elliptique, en outre la courbe du fond Tori-sphérique représente une contrainte maximale plus élevée que celles des autres courbes de fonds.

2. De -15 à -38 :

Aussi les courbes du fond hémisphérique et fond elliptique montrent des valeurs de contrainte maximale similaires et légèrement différentes mais dans cette plage la valeur de contrainte maximale présentée par le fond elliptique est plus faible que celle du fond hémisphérique. Le fond Tori sphérique présente toujours des valeurs de contraintes plus élevées que celles des autres fonds.

B. Pour une pression de 3,8 MPa :

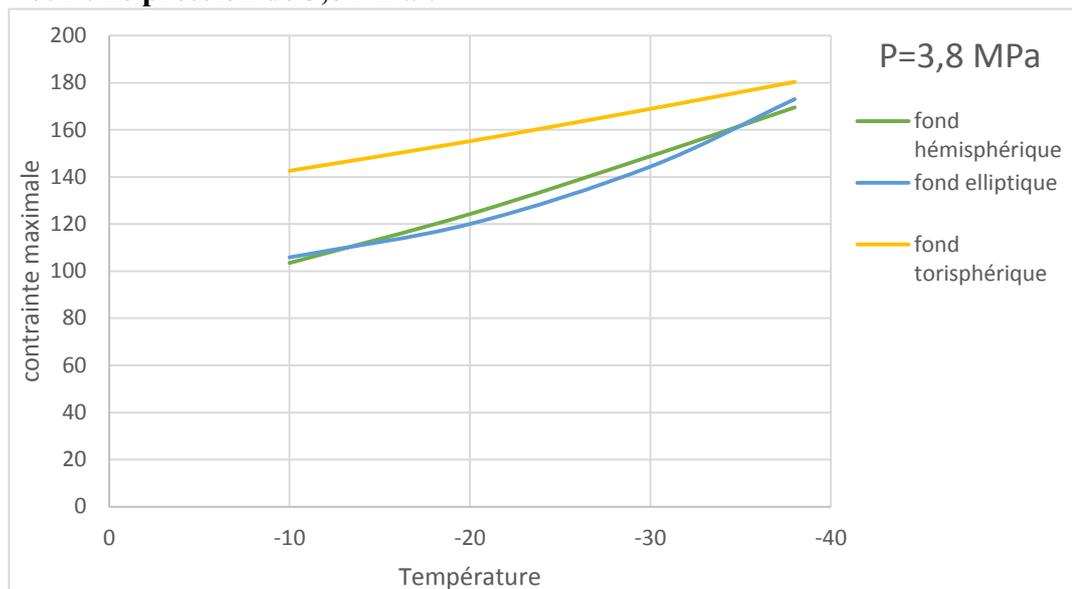


Figure IV- 29 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à $P=3,8$ MPa

Ce **graphe IV-29** représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante $P=3,8$ MPa ; également, on peut deviner les résultats en trois plages :

1. De -10 à -13 °C :

Les courbes du fond hémisphérique et fond elliptique représentent des valeurs de contrainte maximale similaires et légèrement différentes que la valeur de la contrainte du fond hémisphérique est plus faible que celle du fond elliptique, le fond Tori-sphérique représente des valeurs des contraintes plus élevées de celles des autres courbes de fonds.

2. De -13 à -35 °C :

Les courbes du fonds hémisphérique et elliptique représentent des valeurs proches mais les valeurs de contrainte du fond elliptique sont faibles que celles du fond hémisphérique, en outre les valeurs de contrainte du fond Tori sphérique sont toujours plus élevées par rapport aux celles des autres fonds.

3. De -35 à -38 :

On peut donner des mêmes remarques pour celles du première plage (De -10 à -13°C)

Les courbes du fond hémisphérique et fond elliptique représentent des valeurs de contrainte maximale similaires et légèrement différentes que la valeur de la contrainte du fond hémisphérique est plus faible que celle du fond elliptique, le fond Tori-sphérique représente des valeurs des contraintes plus élevées de celles des autres courbes de fonds.

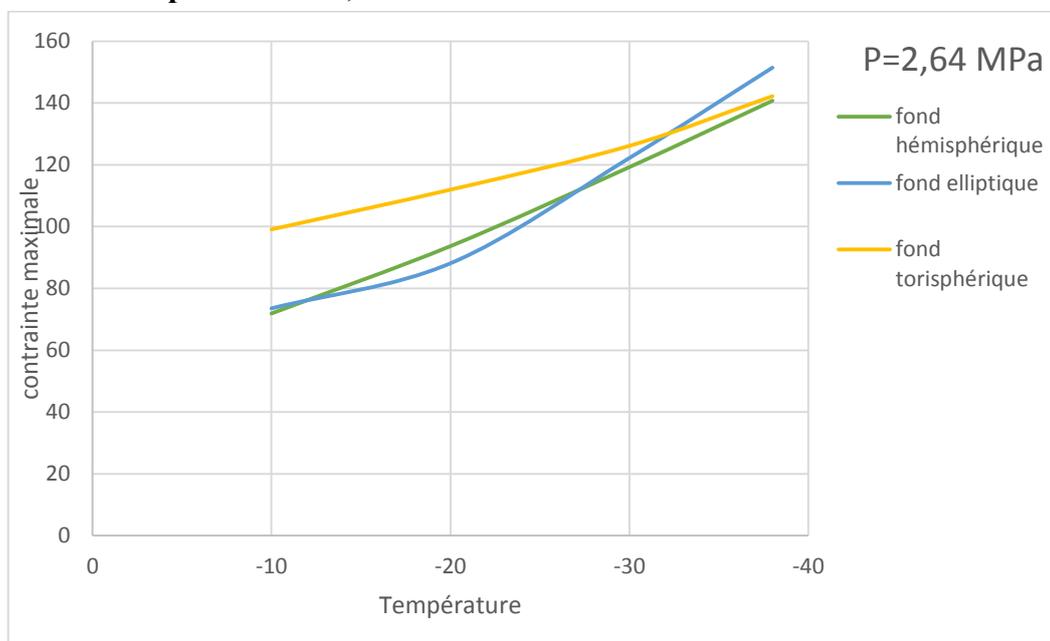
C. Pour une pression de 2,64 MPa :

Figure IV- 30 variation de la contrainte maximale en fonction de changement de la température à $P=2,64\text{MPa}$

Ce graphe IV-30 représente la variation de la contrainte maximale en fonction du changement de la température dans une pression constante $P=2,64\text{ MPa}$; les résultats ont été divisées en quatre plages, comme suit :

1. De -10 à -12 °C :

Les courbes du fonds hémisphérique et elliptique représentent des valeurs des contraintes maximales similaires sauf que les valeurs de contrainte du fond hémisphérique sont faibles que celles du fond elliptique, les valeurs de la contrainte maximale représentées par le fond Tori sphérique sont toujours plus élevées que celles des autres fonds.

2. De -12 à -27 °C :

Les courbes du fond hémisphérique et elliptique représentent des valeurs des contraintes maximales similaires sauf que les valeurs de contrainte du fond hémisphérique sont élevées que celles du fond elliptique, les valeurs de la contrainte maximale représentées par le fond Tori sphérique sont toujours plus élevées que celles des autres fonds.

3. De -27 à -32 °C :

La courbe du fond hémisphérique présente généralement des valeurs de contrainte maximale faibles que celles des autres courbes des fonds.

La courbe du fond elliptique présente des valeurs de contrainte maximale légèrement plus élevées que le fond hémisphérique en tant que la courbe du fond Tori sphérique présente des valeurs plus élevées de autres courbes, sauf dans la température -27 °C les trois courbes représentent la même valeur de la contrainte maximale.

4. De -32 à -38 °C :

La courbe du fond hémisphérique présente des valeurs de contrainte maximale plus faible que celle du fond Tori-sphérique, et le fond Tori-sphérique présente des valeurs de contrainte maximale plus faibles que celles du fon elliptique.

IV.4.2.4.2 Le déplacement total :

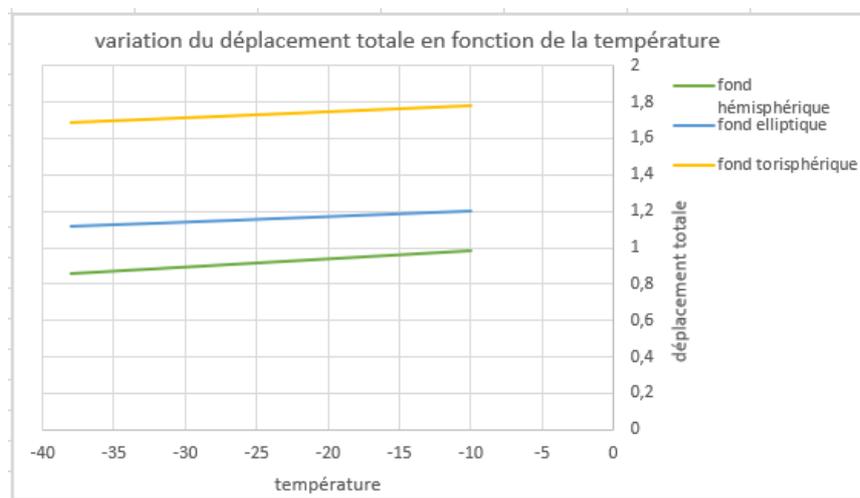


Figure IV- 31 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=4,96MPa$

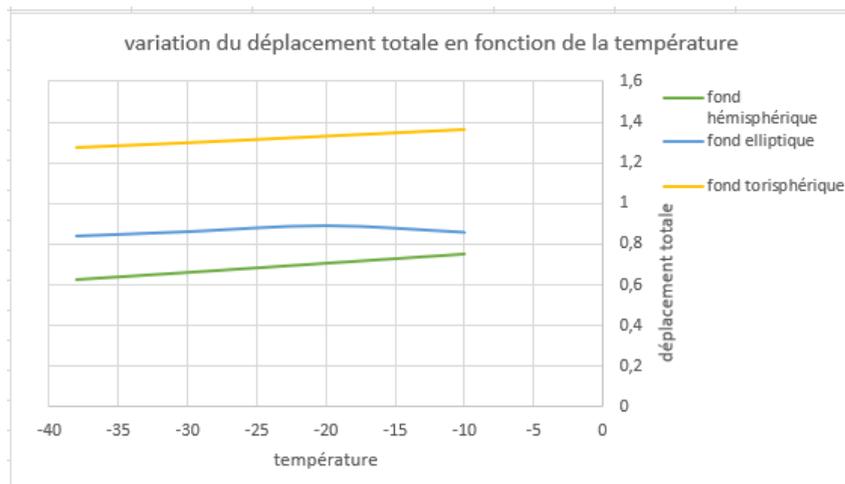


Figure IV- 32 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=3,8\text{MPa}$

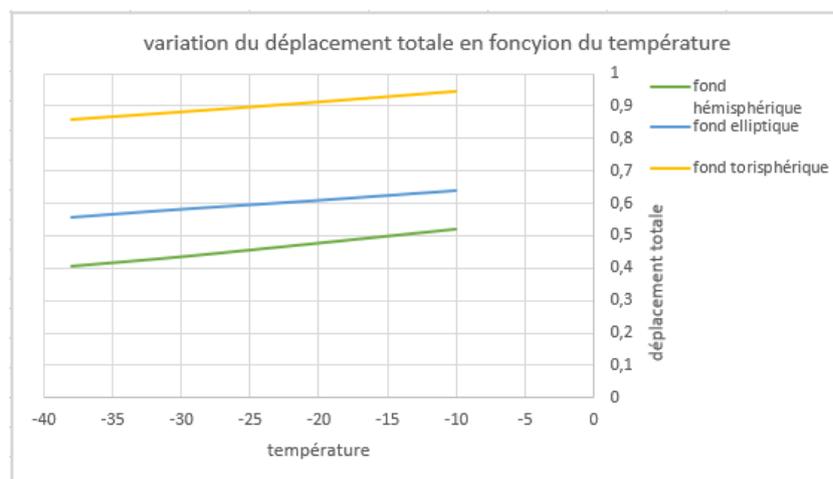


Figure IV- 33 comportement de déplacement total en fonction de la température à une pression constante $P=2,64\text{MPa}$

Ces trois graphes IV-31, IV-32 et IV-33 représentent la variation du déplacement total en fonction de changement de la température dans des pressions constantes (4,96 ; 3,8 ; 2,64MPa) :

Dans les trois cas on peut observer que les trois courbes sont décroissantes, le déplacement totale diminue en fonction de diminution 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 elliptique après le fond Tori sphérique, ce qui indique que le fond hémisphérique offre une plus grande stabilité et une moindre déformation en réponse aux changements de température.

IV.5 Interprétation des résultats de L'intelligence Artificielle :

IV.5.1 Validation de la précision de code :

Après avoir exécuté le code pour s'entraîner et d'apprendre à partir des données, nous avons obtenu une valeur **R-squared** (**R-squared score** est une mesure de l'adéquation du modèle aux données, une valeur proche de 1 indiquant une bonne adéquation.) très proche de 1. Cela indique que les prédictions du modèle s'alignent étroitement sur les valeurs réelles, ce qui suggère un niveau élevé de précision dans l'explication de la variation de la variable cible.

```
[10] # Compute the R-squared score
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
print('R-squared score:', r2)

R-squared score: 0.9998915818898142
```

Figure IV- 34 le résultat de la couche R-squared

Le code prend les données et les divise en ensembles de formation et de test. Il analyse les caractéristiques et les valeurs cibles des données d'apprentissage afin de former un modèle permettant de prédire les valeurs cibles. Ensuite, le code applique le modèle formé aux données de test, en les traitant comme de nouvelles données, et prédit les valeurs cibles. Les valeurs prédites sont ensuite comparées aux valeurs réelles, ce qui permet d'obtenir des valeurs **R-squared** qui évaluent les performances du modèle. Le graphique qui en résulte fournit une représentation visuelle de la comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs réelles, ce qui facilite l'évaluation de la précision du modèle.

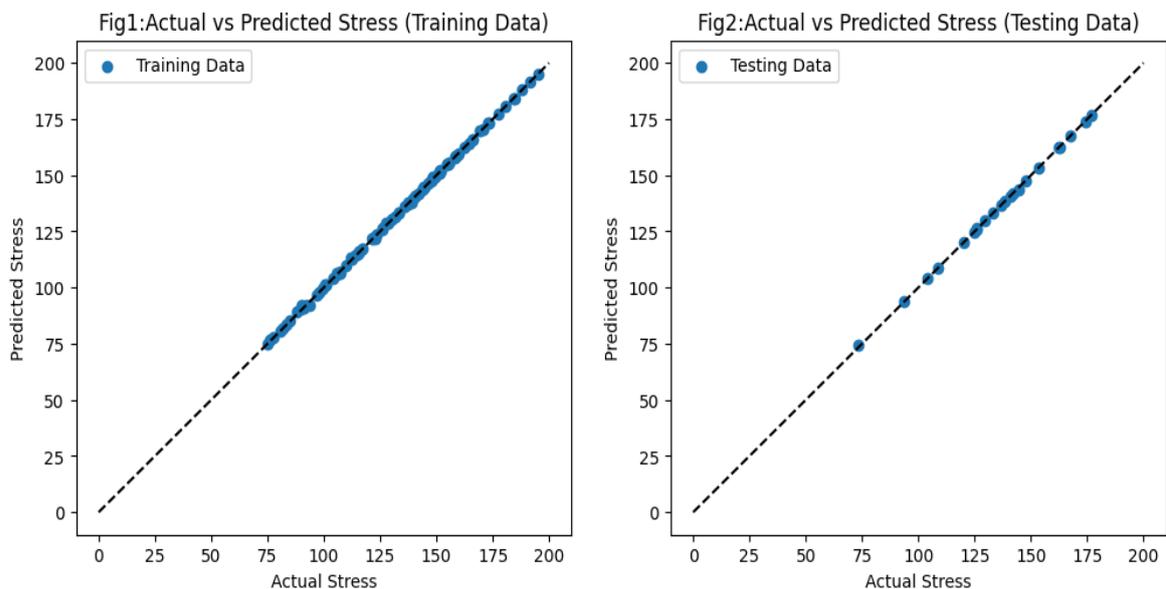


Figure IV- 35 représentation graphique de la précision du code (données de test et d'entraînement)

L'axe des x représente les valeurs de contrainte réelles des points de données et l'axe des y représente les valeurs de contrainte prévues, dans les deux figures.

Fig1 : La ligne avec une pente de 1 représente les vraies valeurs de contrainte pour les données d'apprentissage. Les points bleus représentent les valeurs de contrainte prédites par le code. L'alignement étroit entre les points bleus et la ligne indique une formation réussie et des prédictions précises. Cela suggère que le code est performant dans la prédiction des valeurs de contrainte pour les conditions données.

Fig2 : Dans la deuxième figure, la ligne avec une pente de 1 représente toujours les vraies valeurs de contrainte, tandis que les points bleus représentent les valeurs de contrainte prédites pour les données testées. La proximité des points bleus par rapport à la ligne indique que le code prédit avec précision les valeurs de contrainte pour les nouvelles données. Cela suggère que le code est performant dans la généralisation à des données non vues et qu'il présente un taux de prédiction élevé.

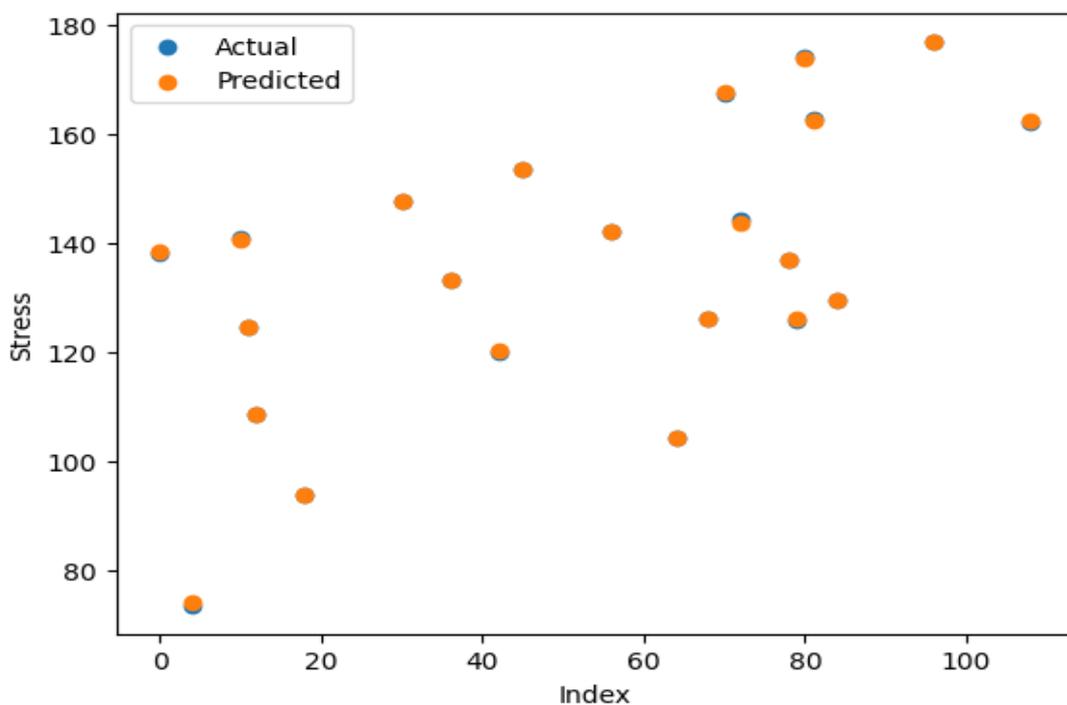


Figure IV- 36 représentation graphique de la précision du code (données de test)

Le Figure compare les valeurs réelles et prédites du stress pour les données de test. Les points bleus représentent le stress réel, tandis que les points orange représentent le stress prédit. Les points sont généralement proches et certains points se superposent, ce qui indique une excellente capacité de prévision du code.

En résumé, le code développé montre des performances impressionnantes avec un fort entraînement et une grande précision et avec une marge d'erreur très faible, démontrant son efficacité dans la prédiction, et les résultats obtenus à partir des graphes valident l'efficacité du code et soulignent son potentiel en tant qu'outil fiable pour la prédiction des contraintes.

IV.5.2 Présentation Des résultats de code :

```
[12] # Predict the target values for new data
new_data = pd.DataFrame({'Temperature': [22, -30, -45, -2, -9, -10, -17, -6, -62, -50, -22, 15, 30, 20, -32, -60, -23],
                        'Pressure': [5, 10, 5, 2, 6, 5, 8, 5, 4, 5, 7, 5, 3, 5, 1, 5, 9]})
new_data_scaled = scaler.transform(new_data)
predicted_values = model.predict(new_data_scaled)

# Print predicted values and their verification status
print('\033[1;30mPredicted values:\033[0m')
for value in predicted_values:
    verification_status = '\033[32mVerified\033[0m' if value <= 205.5 else '\033[31mNot Verified\033[0m'
    print('\033[1;30m{:.2f}\033[0m - {}'.format(value, verification_status))

Predicted values:
158.25 - Verified
337.69 - Not Verified
222.97 - Not Verified
58.77 - Verified
169.54 - Verified
139.72 - Verified
243.62 - Not Verified
137.97 - Verified
269.40 - Not Verified
243.64 - Not Verified
216.31 - Not Verified
149.61 - Verified
120.92 - Verified
```

Figure IV- 37 résultats de la couche des nouvelles données

Cette cellule est responsable de la prédiction des valeurs de contrainte pour de nouvelles données ou de nouvelles conditions dont nous souhaitons connaître la contrainte résultante. Elle prédit d'abord les valeurs de contrainte en fonction des données ou conditions fournies. Ensuite, elle vérifie si ces valeurs prédites se situent dans la plage autorisée. Si les valeurs prédites se situent dans la plage autorisée, elles sont classées comme **vérifié (verified)** ; sinon, elles sont classées comme **non-vérifié (not-verified)**. Ce processus de classification permet d'évaluer la validité des valeurs de contrainte prédites par rapport à la plage spécifiée.

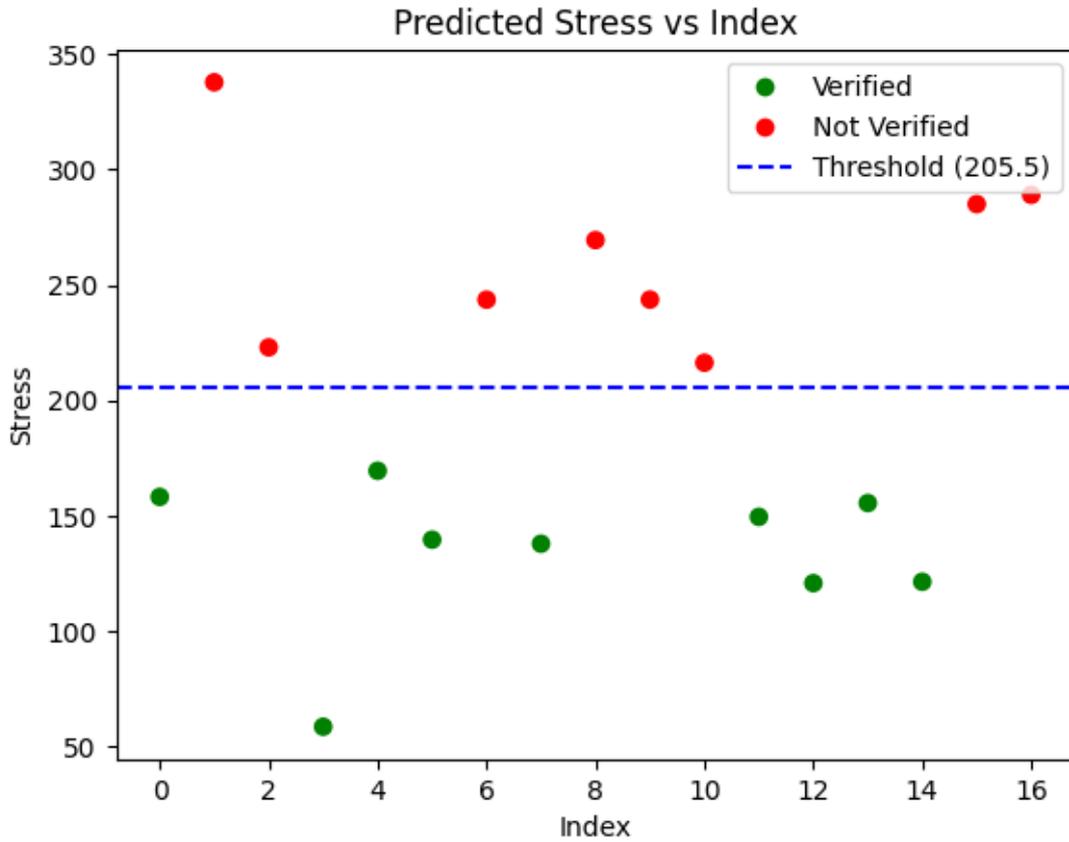


Figure IV- 38 représentation graphique des résultats des nouvelles données

Ce graphique représente visuellement les résultats de la prédiction, les points verts indiquant les valeurs vérifiées inférieures au seuil et les points rouges indiquant les valeurs non vérifiées supérieures au seuil. En affichant ce graphique, le code fournit une représentation claire des résultats, ce qui facilite l'interprétation et la compréhension de la manière dont les valeurs prédites sont calibrées

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En industrie, les réservoirs sous pression bénéficient d'un traitement spécial en raison de la possibilité de déformations permanentes indésirables qui peuvent compromettre leur fonctionnement et leur durée de vie. Ces réservoirs sont soumis à des normes strictes de conception, de fabrication et de contrôle de qualité pour garantir leur intégrité structurelle.

L'objectif de notre étude était d'analyser l'impact de la température, la pression et le type de fond sur les performances de la colonne de distillation 501E. Les résultats obtenus révèlent des observations significatives concernant cet effet :

- Le fond Tori-sphérique présente des contraintes particulièrement élevées par rapport aux fonds hémisphérique et elliptique. Par conséquent, il est considéré comme défavorable pour notre cas.
- Fonds hémisphérique et elliptique : Les résultats des études démontrent que les fonds hémisphérique et elliptique présentent généralement des performances similaires. Cependant, sans prise en compte de la température, le fond elliptique apparaît plus favorable que le fond hémisphérique en termes de réduction des contraintes maximales.

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

- Les basses températures entraînent généralement une réduction du déplacement total, indépendamment de la pression exercée sur les parois du fond et de la colonne.
- Fond hémisphérique offre une stabilité légèrement supérieure avec des déplacements totaux plus faibles par rapport aux fonds elliptique et Tori sphérique. Par conséquent, le fond hémisphérique est considéré comme le meilleur choix pour réduire les déplacements totaux ou les déformations indésirables liées aux variations de température et de pression.
- Les résultats obtenus indiquent que : le complexe GNL2/Z a réussi de choisir le fond elliptique pour réduire les contraintes maximales.

Recommandation : tandis que le fond hémisphérique a donné des résultats similaires de celles du fond elliptique en termes de résistance aux contraintes maximales, et il a été préférable pour minimiser les déplacements totaux ou les déformations indésirables, ça nous donne des indications précieuses pour la recommandation d'un fond hémisphérique pour la colonne de distillation 501E comme un deuxième choix afin d'optimiser son fonctionnement et sa durabilité.

Pour l'intelligence artificiel : après avoir développé le code, nous avons constaté que les résultats obtenus sont aussi acceptables, voire meilleurs que ceux obtenus par simulation. Par conséquent, nous pouvons affirmer que ce code peut être utilisé pour rendre le processus beaucoup plus facile, avec de bons résultats et sans passer par approche numérique qui peut prendre beaucoup de temps. Alors, l'utilisation de cette approche basée sur l'intelligence artificielle offre une alternative efficace à la simulation, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité et les performances de manière significative.

Bibliographie et annexe

Bibliographie :

- [1] Design & Stress Analysis of a Cylinder with Closed ends using ANSYS A. Dhanaraj1, Dr. M. V. Mallikarjuna2,
- [2] 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)
- [3] V. V. Wadkar, "DESIGN AND ANALYSIS OF PRESSURE VESSEL USING ANSYS" Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET) Volume 3, Issue 2, July-Dec 2015
- [4] Bhagat Meghraj Vitthal, "Axisymmetric Stress Analysis of internally Pressurized Rotating Cylinder using Finite Element Method" National Institute of Technology Rourkela 2010
- [5] Zick L.P, "Stresses in large horizontal cylindrical Pressure vessel on two saddle supports," World academy of science, Engineering and technology. International journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol 8. No :12, 2014
- [6] Tapan Majumder, "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
- [7] D. V. Bhoje, "STRESS ANALYSIS OF PRESSURE VESSEL WITH DIFFERENT END CONNECTIONS" IPASJ International Journal of Mechanical Engineering (IJME) Volume 3, Issue 11, November 2015
- [8] Digvijay Kolekar and Jewargi S.S, "Stress Analysis of Pressure Vessel with Different Type of End Connections by FEA", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 5, pp. 2769-2775, May 2015.
- [9] Pressure Vessel Design Manual" par Dennis R. Moss et Michael M. Basic
- [10] A critical review and analysis of pressure vessel structures Abdolreza Toudehdehghan1 and Tan Wai Hong1
- [11] DESIGN AND ANALYSIS OF PRESSURE VESSEL USING ANSYS V. V. Wadkar, S.S. Malgave, D.D. Patil, H.S. Bhore, P. P. Gavade
- [12] "Distillation Design" par Henry Z. Kister
- [13] Pressure vessel design manual DR Moss - 2004
- [14] D. C. Kaminski, Stress Analysis & Pressure Vessels, 2005.
- [15] ASME CODE BOOK 2021

- [16] ANSYS Description guide (<https://www.ansys.com/>)
- [17] SolidWorks description Guide <https://www.solidworks.com/>
- [18] D. Mouloud, « Simulation Numérique par ANSYS Workbench, » researchgate, Inc, avril 2017.
- [19] Fundamental FEA Concepts and Applications A Guidebook for the Use and Applicability of Workbench Simulation Tools, ANSYS, Inc.
- [20] McKinsey Global Institute. (2021). Notes from the AI frontier : Insights from hundreds of use cases. (Discussion Paper).
- [21] Russell, S. J., & Norvig, P. (2022). Artificial intelligence : A modern approach (4th ed.). Pearson. (Book)
- [22] Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., & Barata, J. (2020). Industrial artificial intelligence in industry 4.0-systematic review, challenges and outlook. *IEEE Access*, 8, 220121-220139.
- [23] Dankwa, S., & Zheng, W. (2019). Special issue on using machine learning algorithms in the prediction of kyphosis disease : a comparative study. *Applied Sciences*, 9(16), 3322. (Paper).
- [24] Theissler, Andreas, et al. "Predictive maintenance enabled by machine learning : Use cases and challenges in the automotive industry." *Reliability engineering & system safety* 215 (2021) : 107864. (Paper).
- [25] Zhang, C., & Lu, Y. (2021). Study on artificial intelligence : The state of the art and futures prospects. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224. (Paper).
- [26] Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685-695.
- [27] İlker Güven, Fuat Şimşir (2002). Demand forecasting with color parameter in retail apparel industry using artificial neural networks (ANN) and support vector machines (SVM) methods
- [28] Lau, Suki (2017). "A Walkthrough of Convolutional Neural Network"
- [29] <https://www.javatpoint.com/artificial-neural-network>. ANN. ANN Tutorial
- [30] https://www.researchgate.net/figure/a-Representation-of-Artificial-Intelligence-and-its-subfields-b-Components-of_fig1_335163811

[31] https://www.researchgate.net/figure/a-Representation-of-Artificial-Intelligence-and-its-subfields-b-Components-of_fig1_335163811

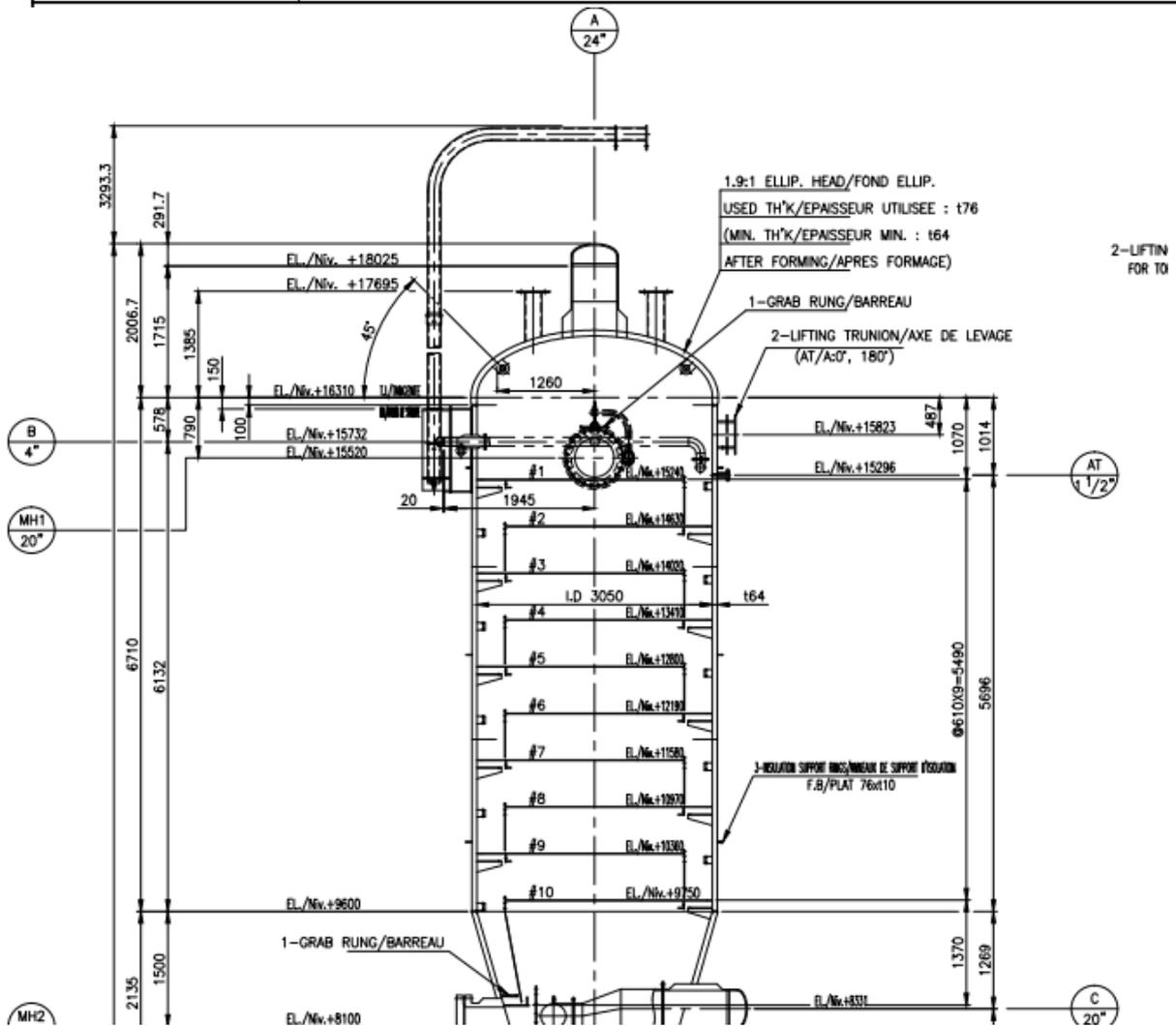
[32]https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligence_neural_networks.htm

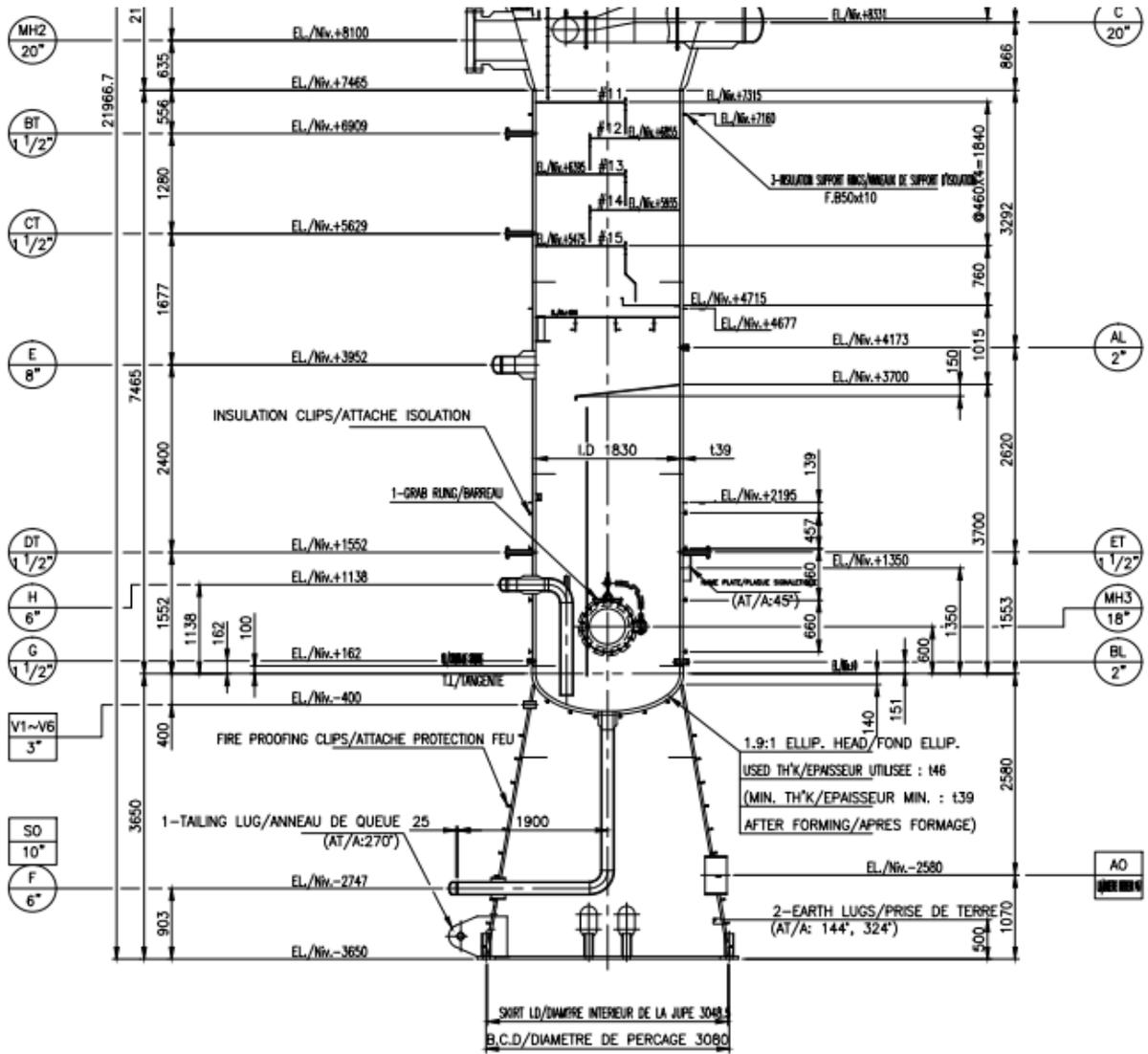
Annexe :

OWNER :				SONATRACH	
CONTRACTOR/CONTRACTEUR :				PRODUITS ET ACCESSOIRES INDUSTRIELS	
PROJ. NO./No. DE COMMANDE	-			UBEC Inc ULSAN, KOREA	
WORK NO./NOMBRE W	UBEC-P12-016				
SEMI. NO./No. DE SERE	-				
PROJECT NAME/NOM DU PROJET : GL2-Z RENOVATION/RENOVATION					
DRWN./DRESSE	TY ENG	TITLE/TITRE : 501E SCRUBBER/ SCRUBBER (GENERAL ASSEMBLY)/(PLAN D'ENSEMBLE)			
CHK'D/VERIFIE	J.M.PARK				
APP'D/APPROBATION	J.K LIM				
P.M	-	DWG. NO./PLAN No. VP-501E-001			
ADD. INFLUENT/REVISION (CONT./SUITE)	-				
JOB NO./NOM D'AFFAIRE (SKJ/SKIKDA)	-	SCALE/ECHELLE	1/50	DATE/DNIE	AOUT16.'12
				REV.	

DESIGN DATA / CARACTERISTIQUE DE DESIGN			
CODE/CODE	ASME SEC. VIII DIV.1 2010 ED.+2011 ADD./ASME SEC. VIII DIV.1 Ed. 2010 + Add. 2011	CODE STAMP/POINCON DU CODE	OUI
VOLUME/ VOLUME	83.6		m ³
NO. OF REQ'D/NOMBRE REQUIS	1 (ONE) SET/1 (UN) JEU		
KIND OF FLUID/SORTE DE FLUIDE	HYDROCARBON/HYDROCARBURE		
SPECIFIC GRAVITY/MASSE SPECIFIQUE	-		
DESIGN PRESS./PRESSION DE CALCUL (INT./EXT.)	49.6		Bar.G
DESIGN TEMP./TEMPERATURE DE CALCUL (INT./EXT.)	94		°C
OPER. PRESS./PRESSION DE SERVICE	41.7 / 45		Bar.G
OPER. TEMP./TEMPERATURE DE SERVICE	-70 / 28		°C
HYDRO. TEST PRESS./ PRESSION D'ESSAI HYDRO.	AT SHOP/EN ATELIER	74.4	Bar.G
	AT FIELD/SUR SITE	-	Bar.G
PNEUM. TEST PRESS./PRESSION D'ESSAI DE MISE EN PRESSION PNEUMATIQUE	-		Bar.G
MAWP./PRESSION DE SERVICE MAXIMALE ADMISSIBLE	49.6		Bar.G

P.W.H.T/TRAITEMENT THERMIQUE APR? SOUDAGE	NONE/NON APPLICABLE					
S.R AFTER COLD FORMING/INTENTIONNEMENT APRES FORMAGE A FROID	NONE/NON APPLICABLE					
RADIOGRAPH/RAIDIO.	FULL/FULL/100%					
JOINT EFFICIENCY/COEFFICIENT DE SOUDURE	100/100			%		
CORR. ALLOW./TOLERANCE DE CORROSION	0			mm		
INSULATION/ISOLATION (IH)	-			mm		
FIRE PROOFING/PROTECTION INCENDIE	50			mm		
M.D.M.T/TEMPERATURE MINIMUM DE CALCUL	-123.3			°C		
WIND VELOCITY/VITESSE DU VENT	160 km/h					
SEISMIC ZONE/ZONE SISMIQUE	RPA 99-2003, ZONE II/REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES 99 VERSION 2003, ZONE II					
PAINTING/REVETEMENT	LATER/ULTERIEUREMENT					
WEIGHT/POIDS	ERECTION/ERECTION	85,870	kg	EMPTY/VIDE	93,400	kg
	OPERATING/DE SERVICE	103,100	kg	FULL OF WATER/PLEIN D'EAU	183,000	kg
LOCAL REGULATION LAW/LOI DE REGULATION LOCALE	-					





Température (°C)	Pression	Contrainte maximale
-10	4,96	138,19
	4,38	122,03
	3,8	105,87
	3,22	89,71
	2,64	73,55
-11	4,96	139,51
	4,38	123,39
	3,8	107,20
	3,22	91,042
	2,64	74,886
-12	4,96	140,86
	4,38	124,7
	3,8	108,55
	3,22	92,4
	2,64	76,252
-13	4,96	142,22
	4,38	126,07
	3,8	109,92
	3,22	93,782
	2,64	77,647
-15	4,96	144,99
	4,38	128,86
	3,8	112,73
	3,22	96,616
	2,64	80,52
-16	4,96	146,4
	4,38	130,27
	3,8	114,16
	3,22	98,066
	2,64	81,994
-17	4,96	147,82
	4,38	131,71
	3,8	115,61
	3,22	99,536
	2,64	83,492
-18	4,96	149,25
	4,38	133,16
	3,8	117,08
	3,22	101,03
	2,64	85,013
-20	4,96	152,17
	4,38	136,10
	3,8	120,06
	3,22	104,06
	2,64	88,12
-21	4,96	153,64
	4,38	137,6
	3,8	121,58
	3,22	105,61
-22	2,64	90,153
	4,96	155,13
	4,38	139,11
	3,8	123,11
	3,22	107,17
-24	2,64	93,648
	4,96	158,15
	4,38	142,16
	3,8	126,22
	3,22	112,00
-25	2,64	100,68
	4,96	159,67
	4,38	143,71
	3,8	127,79
	3,22	115,50
-28	2,64	104,23
	4,96	164,32
	4,38	148,47
	3,8	137,36
	3,22	126,09
-30	2,64	114,97
	4,96	167,46
	4,38	155,71
	3,8	144,41
	3,22	133,22
-31	2,64	122,19
	4,96	170,59
	4,38	159,22
	3,8	147,95
	3,22	136,81
-32	2,64	125,82
	4,96	174,08
	4,38	162,74
	3,8	151,51
	3,22	140,40
-33	2,64	129,46
	4,96	177,58
	4,38	166,28
	3,8	155,08
	3,22	144,01
-35	2,64	133,10
	4,96	184,61
	4,38	173,38
	3,8	162,25
	3,22	151,25
-36	2,64	140,42
	4,96	188,14
	4,38	176,93
	3,8	165,84
	3,22	154,88
-37	2,64	144,08
	4,96	191,68
	4,38	180,51
	3,8	169,44
	3,22	158,52
-38	2,64	147,76
	4,96	195,23
	4,38	184,08
	3,8	173,05
	3,22	162,16
	2,64	151,43