

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



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



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication Mécanique et productique

Titre

**ETUDE ET CONCEPTION D'UNE CUVE SOUS
PRESSION
ASME VIII**

Proposé et encadré par :

D^r. MADANI Fateh

Réalisé par :

KHEMMALI Zakaria

HADJEB Tayeb

Année universitaire 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances pour toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre travail et qui nous ont aidé à réaliser ce projet de fin d'études.

Nous voudrions dans un premier temps remercier nos chers parents et nos familles qui ont toujours été là pour nous avec leur soutien constant et leur encouragement.

*Puis nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr. MADANI Fateh** qui nous a donné beaucoup de son temps et sa patience, et qui nous a encadré, orienté et conseillé.*

*Nous remercions les responsables de la société **CR- METAL** qui nous ont bien reçus et accueillis, sans oublier les travailleurs la-bas qui nous ont aidé.*

*Nous remercions aussi **Pr. BRAHIMI**, chef département de génie mécanique de l'université saaddahleb blida.1 et toute la famille pédagogique du département.*

Enfin nous présentons nos remerciements à nos amis(es) et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Nous dédions ce travail à nos tres chers parents qui nous ont donnés de l'énergie et qui nous ont encouragés et poussés dans debonnes conditions pour terminer ce travail.

... A nos familles, nos sœurs, à tous nos amis en particulier qui sont toujours là pour nous.

A tous ceux que nous aimons,

A tous ceux qui nous aiment.

KHEMMALI Zakaria

HAJEB Tayeb

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI

Chapitre I : Généralités sur les cuves sous pression

I.1. Introduction générale sur les cuves sous pression.....	2
I.1.1. Fabrication.....	2
I.1.2. Utilisations.....	3
I.1.3. Utilisation dans le secteur pétrolier et dans le secteur pétrochimique.....	3
I.2. Réservoirs sous pression.....	4
I.2.1. Les sphères.....	4
I.2.2. Les réservoirs horizontaux.....	5
I.2.3. Réservoirs atmosphériques.....	5
I.3. Le métal utilisé dans la fabrication de la cuve.....	6
I.3.1. Définition de l'acier.....	6
I.3.2. Certification d'essai en usine de la plaque d'acier au carbone.....	6
I.3.3. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Spécifications et normes.....	7
I.3.4. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Composition chimique.....	7
I.3.5. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Propriétés mécaniques.....	7
I.4. Equipement sous Pression.....	8
I.4.1. Comment Cela Fonctionne-t-il ?.....	8
I.4.2. Applications des Équipements sous Pression dans L'industrie.....	8
I.5. Types d'équipement sous Pression.....	10
I.5.1. Cuve (réservoir) de Process.....	10
I.5.2. Autoclaves.....	10
I.5.3. Réservoirs à haute pression.....	10
I.5.4. Fonctions typiques des récipients à haute pression.....	10
I.5.5. Vase d'expansion.....	10
I.5.6. Echangeurs de chaleur.....	10
I.5.7. Réservoirs d'eau sous pression.....	11
I.5.8. Réservoirs à vide.....	11
I.5.9. ASME Equipement sous pression.....	11
I.5.10. Enveloppe mince sous pression.....	11
I.5.11. Chaudières.....	11
I.6. La Production des Equipement sous Pression.....	11
I.6.1. La Conception.....	11
I.6.2. Sélection des Matériaux.....	12
I.7. Étapes de la Fabrication d'un Equipement sous Pression.....	14
I.7.1. Fabrication de Têtes Bombées (les Coupelles) en Acier.....	14
I.7.2. Développement de Réservoirs Composites.....	14

I.8. Les Procédés de Soudage des Equipements sous Pression	15
I.8.1. Normes (Standards)	16
I.8.2. Inspection et Analyses	17
I.9. Conclusion	18

CHAPITRE II : Théorie de conception d'une cuve sous pression

II.1. Introduction	21
II.1.1. Sections du code	21
II.2. Base des critères de conception.....	21
II.2.1. Fabricant d'appareils sous pression ASME Section VIII, Division 1	21
II.2.2. ASME Section VIII, Division 2	22
II.2.3. ASME Section VIII, Division 3	22
II.2.4. ASME Section I et Section VIII – fondamentaux	22
II.2.5. Conception.....	22
II.2.6. Valeurs de contraintes maximales admissibles des réservoirs sous pression	22
II.3. Conditions de calcul	24
II.3.1. Données de température minimale de conception	24
II.3.2. Calculs D'épaisseur De Conception.....	24
II.4. Information Sur La Conception Du Fond Elliptique.....	25
II.4.1. Données De Température Minimale De Conception	25
II.5. Informations De Conception Des Tubulures.....	26
II.5.1. Informations Détaillées Sur Les Tubulures	26
II.5.2. Calculs De Renforcement Des Tubulures	28
II.5.3. Force De Soudure De Tuyau Par Paragraphe UW-16 (Etat Corrodé).....	28
II.5.4. Contrainte Unitaire Par Paragraphe UG-45 Et UW-15	29
II.5.5. Force Des Eléments De Connexion.....	29
II.5.6. Charge A Supporter Par Les Soudures, Conformément A La Norme UG-41 (B) (1) De La Norme UG-41.1 (A)	30
II.5.7. Verifier Les Chemins De Force.....	30
II.6. Épaisseur de coque requise selon le paragraphe UG-37 (a).....	30
II.6.1. Calculs d'épaisseur de tuyau requis	30
II.6.2. Calculs d'épaisseur UG-45	31
II.6.3. Force de soudure de tuyau par paragraphe UW-16 (état corrodé)	32
II.6.4. Contrainte unitaire par paragraphe UG-45 et UW-15	33
II.6.5. Force des éléments de connexion	33
II.6.6. Charge A Supporter Par Les Soudures, Conformément A La Norme UG-41 (b) (1) de la norme UG-41.1 (a)	34
II.6.7. Verifier Les Chemins De Forces	34
II.7. Epaisseur De Coque Requisite Selon Le Paragraphe UG-37 (a)	34
II.7.1 Calculs D'épaisseur De Tuyau Requis.....	34
II.7.2. Épaisseur De La Tuyau Pour Le Chargement Sous Pression (Plus Corrosion) Selon Le paragraphe UG-45 (a)	34
II.7.3. Epaisseur De La Tubulure Pour La Pression Interne (plus corrosion) par paragraphe UG-45 (b) (1) :.....	35

II.7.4. Epaisseur Minimale Du Tuyau De Paroi Standard (plus corrosion) selon le paragraphe UG-45(b)(4).....	35
II.7.5. Epaisseur Minimale De La Tubulure Par Paragraphe UG-45(b)	35
II.8. Epaisseur requise de la bride hôte	35
II.8.1. Calculs d'épaisseur de tuyau requis.....	35
II.8.1.2. Epaisseur De La Tuyau (Plus La Corrosion) Par Paragraphe UG-45 (a).....	35
II.8.2. Epaisseur De La Tuyau Pour La Pression Interne (plus la corrosion) par paragraphe UG-45	36
II.8.3. Epaisseur requise de la bride hôte	36

Chapitre III : Conception et simulation d'une cuve sous pression SolidWorks

III.1. Le logiciel SolidWorks Le logiciel de CAO SolidWorks.....	38
III.1.1. Concepts	38
III.2. Différents composants de la cuve	38
III.3. Conception des composants de la cuve.....	39
III.3.1. Présentation de virole	39
III.3.2. Présentation de virole droite-gauche	39
III.3.3. Présentation des fonds 1	40
III.3.4. Présentation des fonds 2	40
III.3.5. Présentation de berceau	41
III.3.6. Présentation d'anneau de levage 1	41
III.3.7. Présentation d'anneau de levage 2	42
III.3.8. Présentation de bride 1	42
III.3.9. Présentation de union d 120	43
III.3.10. Présentation de union vis.....	43
III.3.11. Présentation tubulure remplissage.....	44
III.3.12. Présentation npt	44
III.3.13. Présentation de skid.....	47
III.3.14. Présentation welding neck flange.....	47
III.4. Assemblage des composants	48
III.5. Mise en plan des pièces.....	50
III.5.1. Mise en plan de virole	50
III.5.2. Mise en plan de fond elliptique	51
III.5.3. Mise en plan de berceau	51
III.5.4. Mise en plan de bride	52
III.5.5. Mise en plan flag	52
III.5.6. Mise en plan skid.....	53
III.5.7. Mise en plan de npt	54
III.5.8. Mise en plan union vis.....	54
III.5.9. Mise en plan de la cuve	55
III.6. Simulation de la cuve sous pression	57
III.6.1. Introduction	57
III.7. Assemblage de la cuve.....	58
III.7.1. Informations sur le modèle.....	58

III.7.2. Propriétés de l'étude	59
III.7.3. Unités	60
III.7.4. Propriétés du matériau.....	60
III.7.5. Actions extérieures	61
III.7.6. Informations sur le contact	62
III.7.7. Informations sur le maillage.....	62
III.7.8. Informations sur le maillage - Détails	62
III.7.8. Forces résultantes	62
III.7.9. Résultats de l'étude	63
III.8. Conclusion	64

CHAPITRE IV : Fabrication et soudage d'une cuve sous pression

IV.CONCEPTION.....	66
IV.1. Les étapes de fabrication d'une virole.....	66
IV.2. Les étapes de fabrication des fonds	67
IV.3. Fond bombé à souder pour cuve	68
IV.3.1. Fonds bombés	68
IV.3.2. FOND GRC : fond à grand rayon de carre	68
IV.3.3. FOND PRC : fond à petit rayon de carre	69
IV.3.4. FOND ELL : fond elliptique.....	69
IV.3.5. Fond plat	70
IV.3.6. Fond conique.....	70
IV.3.7. Calotte sphérique.....	70
IV.4. Généralités sur le soudage	71
IV.4.1. Définition	71
IV.4.2. Principe	71
IV.4.3. Différence entre soudage et brasure.....	71
IV.4.4. Soudage plasma.....	74
IV.5 Principaux métaux pour soudage.....	75
IV.6. Différents types de joints de soudure.....	75
IV.7. Les défauts de soudage	76
IV.7.1. Les fissures.....	76
IV.7.2. Les soufflures	77
IV.8. Défauts de soufflures ou cavités	78
IV.8.1. Types de soufflures fréquentes	78
IV.8.2. Causes des soufflures	78
IV.8.3. Remèdes contre le défaut de soufflures	79
IV.9. Défauts de fissures	79
IV.9.1. Types de fissures fréquentes	79
IV.9.2. Causes des fissures.....	80
IV.9.3. Remèdes contre les fissures	80
IV.9.4. La fissuration à chaud	80
IV.10. Défaut de manque de fusion (collage).....	81
IV.10.1. Types de manque de fusion.....	81

IV.10.2. Causes des défauts de collage	81
IV.11. Défaut de pénétration.....	81
Causes des défauts de manque de pénétration	82
IV.12. Défaut d'effondrement	83
IV.12.1. Types d'effondrements	83
IV.13. Défauts retassures et criques.....	84
IV.14. Morsures et caniveaux	84
IV.15. Défauts géométriques des cordons	85
IV.16. Défaut de concavité	86
IV.17. Défaut d'alignement	86
IV.18. Déformations angulaires.....	86
IV.19. Les déformations de soudage	87
IV.20. Contrôle avant le soudage.....	88
IV.20.2. Contrôle au cours du soudage	88
IV.20.1. Contrôle après le soudage	88
IV.20.3. Ressuage.....	90
IV.20.4. Fluorescence.....	91
IV.20.5. Contrôle magnétique (magnétoscopie)	91
IV.20.6. Contrôle radiographique	91
IV.20.7. Ultrasons	92
CONCLUSION GENERALE	93
Références bibliographiques	94

Liste des figures

Figure I. 1: Cuve sphérique.....	4
Figure I. 2: Les réservoirs horizontaux.....	5
Figure I. 3: Réservoirs atmosphériques.....	5
Figure I. 4: Acier ASTM A516 G70.....	6
Figure I. 5: Acier ASME Sa516 G70.....	6
Figure III. 1: Interface graphique de virole sous-SolidWorks.....	39
Figure III. 2: Interface graphique de virole droite- gauche sous-SolidWorks.....	39
Figure III. 3: Interface graphique du fonds elliptique droite sous SolidWorks.....	40
Figure III. 4: Interface graphique du fonds elliptique gauche sous SolidWorks.....	40
Figure III. 5: Interface graphique de berceau sous SolidWorks.....	41
Figure III. 6: Interface graphique d'anneau de levage1 sous SolidWorks.....	41
Figure III. 7: Interface graphique d'anneau de levage 2.....	42
Figure III. 8: Interface graphique de bride 1.....	42
Figure III. 9: Interface graphique de union d 120.....	43
Figure III. 10: Interface graphique de union vis.....	43
Figure III. 11: Interface graphique tubulure remplissage.....	44
Figure III. 12: Interface graphique npt 1.....	44
Figure III. 13: Interface graphique npt 2.....	45
Figure III. 14: Interface graphique npt 3.....	45
Figure III. 15: Interface graphique npt.....	46
Figure III. 16: Interface graphique npt.....	46
Figure III. 17: Interface graphique de skid sous SolidWorks.....	47
Figure III. 18: Interface graphique welding neck flange.....	47
Figure III. 19: Interface d'assemblage.....	48
Figure III. 20: Parcourir le dossier des composants.....	48
Figure IV. 1: Les étapes de fabrication d'une virole.....	66
Figure IV. 2: Les étapes de fabrication des fonds.....	67
Figure IV. 3: FOND GRC.....	68
Figure IV. 4; FOND PRC.....	69

Figure IV. 5: Fond elliptique	69
Figure IV. 6: Soudage au chalumeau.....	72
Figure IV. 7: Soudage TIG.....	73
Figure IV. 8: Soudage MMA.....	73
Figure IV. 9: Soudage MIG –MAG.	74
Figure IV. 10: Soudage Plazma.....	75
Figure IV. 11: Technologie des différents types de soudage selon les normes ISO.	76
Figure IV. 12: Exemples de fissures.....	77
Figure IV. 13: Les différents types de soufflure.....	77
Figure IV. 14: Soufflures et cavités.....	78
Figure IV. 15: Les fissures	79
Figure IV. 16: Inclusions	80
Figure IV. 17: Manque de fusion.....	81
Figure IV. 18: Excès de pénétration	82
Figure IV. 19: Manque de pénétration.....	83
Figure IV. 20: Effondrement du cordon	83
Figure IV. 21: Effondrement en corniche.....	84
Figure IV. 22: Retassure de cratère	84
Figure IV. 23: Morsures	85
Figure IV. 24: Caniveau	85
Figure IV. 25: Convexité.....	85
Figure IV. 26: Concavité	86
Figure IV. 27: Défaut d’alignement	86
Figure IV. 28: Déformation angulaire	87
Figure IV. 29: Déformations de soudage de joint V.....	87
Figure IV. 30: Déformations de soudage d’assemblages en T	87
Figure IV. 31: Contrôle visuel du soudage manuel à l’électrode enrobée	89
Figure IV. 32: Exemple de jauges de contrôle	90
Figure IV. 33: Schéma d’un control par ressuage.	91
Figure IV. 34: Contrôle par magnétoscopie	91
Figure IV. 35: Banc de magnétoscopie	91
Figure IV. 36: Contrôle par courant de Foucault.....	92
Figure IV. 37: Contrôle de pièce fonderie.....	92

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Spécifications et normes équivalentes de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70	7
Tableau I. 2: Composition chimique typique de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70	7
Tableau I. 3: Valeurs mécaniques typiques de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70	8
Tableau II. 1: Valeurs de contraintes maximales admissibles des réservoirs sous pression	23

Résumé :

Ce travail interprète la conception des cuves sous pression en démontrant leurs calculs spécifiques et en éclairant ces étapes notamment le soudage qu'on va cibler leurs problèmes et juste après avoir visées les solutions par des contrôles et des calculs précis.

Tout cela va s'accompagner avec simulation en 3D par un logiciel professionnel « **Le SolidWorks** » qui va parler leur tour aider à améliorer le produit par ses différentes paramètres et ses tests physiques qui vont m'entraîner les problèmes et éviter les échecs et aussi donner une vue large et précise selon un plan de travail.

Abstract :

This work explains pressure vessel industry by denying their exactly calculation and steps, specifically steps of welding, that shows her problems with him the solution. Through flow up and calculations.

All this will be applicable with 3 D simulator who have professional program « SolidWorks

« And the same way this program will make the development of Product, with his setting and experiences who make the difficult clearly in view and avoid in the mistakes and it will give an exactly and clearly view how depend the plan of work.

ملخص

هذا العمل يدرس صناعة خزان الضغط وذلك بتوضيح الحسابات الدقيقة والمراحل خاصة مرحلة التلحيم التي نتطرق الي مشاكلها ومن ثم الى الحلول المقترحة عبر المتابعة والحسابات الدقيقة كل هذا يرافقه محاكاة ثلاثية الابعاد عبر برنامج صوليد ووركس والذي بدوره يساعد على تطوير المنتج، اعداداته وتجاربه التي تبرز المشاكل وتجنب وقوع في الخلل وكذلك يعطي نظرة شاملة ودقيقة حسب مخطط العمل.

Historique de CR. METAL :

CR. METAL, c'est plus de 65 ans d'expérience, c'est aussi plus de 912 agents engagés pour relever le défi et le challenge, c'est aussi une capacité de production de plus de 15000 tonnes par an.

CR METAL est présente pratiquement dans plusieurs secteurs et créneaux d'activité ; vous assure l'Engineering, la fabrication et le montage de la charpente métallique de toute nature, la fabrication et le montage de la chaudronnerie simple et complexe, y compris les Bacs de stockage de toute nature, et actuellement la fabrication des fonds bombés.

CR METAL a hérité du savoir-faire des établissements J. CARMELI créés en 1953, qui étaient déjà spécialisés dans la Chaudronnerie, déclarés biens de l'Etat en juin 1963 et deviennent en janvier 1964 Entreprise Nationale de Constructions Métalliques (E N C M). En février 1975, l'ENCM est rattachée à la SN METAL. Elle bénéficie d'un important programme de renouvellement (Investissements) de son outil de production et l'extension de ses infrastructures, ce qui lui a permis d'augmenter ses capacités de production, qui ont atteint 3000 T / An et de diversifier ses produits, en ajoutant les Stations de Concassage (1980) et le Coffrage Métallique (1982) à la restructuration des Entreprises Publiques.

En 1983, l'unité SN METAL Blida est rattachée à l'ENCC.

Elle bénéficie d'un autre plan d'investissement qui a fait augmenter les capacités installées de 3 000 à 5 000 T / An.

Depuis le 1er juillet 2001, l'Unité Chaudronnerie Blida est devenue une filiale du groupe industriel ENCC SPA, dénommée Société de Construction Métallique, par abréviation CR METAL, sous la forme d'une SPA au capital de 100 000 000 DA. Le 09/04/2002, CR METAL Spa obtenait sa certification ISO 9001 :2000 (organisme certificateur SGS France) En 2003, CR METAL Spa est inscrite dans le 1er programme de mise à niveau initié par le Ministère de l'Industrie. En juillet 2007, CR METAL Spa obtenait sa certification OHSAS 18001-1999 (Santé et Sécurité au Travail), délivrée par le même organisme certificateur. Dans la même période, CR METAL Spa est inscrite dans un 2ème programme de mise à niveau, avec d'importants investissements matériels et immatériels. Toutes ces mutations ont permis à la Société de garder ses parts de marché, voir augmenter, et cela en mettant à la disposition de ses clients des produits diversifiés et de qualité, et aussi de doubler son chiffre d'affaires. La

n°07/210 du 04/07/2007 relatif à la réévaluation des immobilisations non amortissables représentés par les terrains et à la résolution n°02 de l'assemblée générale extraordinaire du 25/12/2007, a procédé à l'augmentation de son capital social qui passe de 100 000 000,00 DA à 680 100 000,00 DA.

Différents produits :

CR METAL ENCC assure la fabrication et la commercialisation de :

***Charpente métallique**



***Chaudronnerie.**



***Équipements industriels divers.**



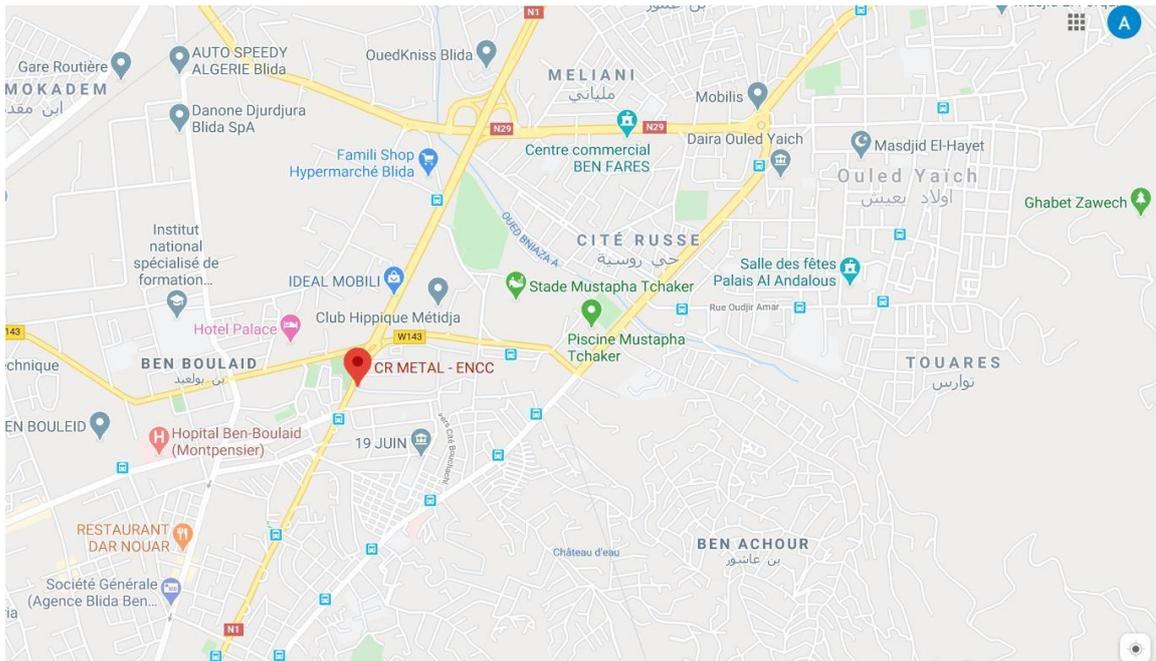
***Fonds bombé.**



***Montage industriel**



Situation géographique :



Intérêts du sujet :

Dans le cadre de la présentation de ce projet de réalisation en vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en Génie mécanique, option Construction et Fabrication Mécanique, un stage de fin d'étude a été réalisé au niveau de l'entreprise Cr métal de Blida qui construit par excellence dans les domaines de la charpente métallique, chaudronnerie, équipements industriels, divers et fonds bombés. Ce stage concerne l'étude de conception sur les cuves sous pression.

Pour évoluer, notre étude débute par une introduction générale, après quoi nous avons partagé notre travail en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons Généralités sur les cuves sous pression pour améliorer notre connaissance dans ce domaine.

Le deuxième chapitre soulève les problèmes sur la théorie de conception des cuves de stockage. Les calculs et les dimensionnements et qui sont nécessaires pour l'utilisation des cuves en toute sécurité dans la mesure où des problèmes de fatigues apparaissent lorsque la structure est soumise à des pressions variables de façon répétée et ainsi que les effets de la corrosion.

Le troisième chapitre est consacré aux conceptions et simulation de ladite cuve. Et enfin le dernier chapitre concerne fabrication et soudage d'une cuve sous pression.

Une conclusion générale comprend les principaux résultats de cette étude suivie des perspectives. Les références bibliographiques qui clôturent ce projet de réalisation.

Chapitre I :
Généralités sur les cuves
sous pression

I.1. Introduction générale sur les cuves sous pression

Les cuves sous pression sont des composants utilisés pour stocker ainsi que pour transmettre des liquides, des gaz ou des vapeurs qui sont sous pression. De par leur conception, les cuves sous pression maintiennent les liquides ou les gaz à une pression différente de la pression ambiante autour du réservoir. Les cuves sous pression sont généralement utilisées pour les chaudières à vapeur, en vue de stocker des substances chimiques dans des usines chimiques, et pour stocker du pétrole et du carburant.

Les cuves sous pression peuvent obtenir leur pression d'une source de chaleur directe ou indirecte. Les cuves sous pression exerceront de la pression de manière égale dans toutes les directions, contre toutes les parois de la cuve physique.

Normes en termes de conception et de fabrication

Les matériaux les plus utilisés pour la fabrication sont :

- L'acier au carbone.
- L'acier inoxydable.

Les cuves sous pression sont souvent des réservoirs sphériques ou cylindriques.

Les deux types principaux de cuves sous pression sont :

1. Les cuves conçues selon une construction finale.
2. Les cuves conçues selon des dimensions.

Les cuves conçues selon une construction finale peuvent être ouvertes ou fermées. Les cuves sous pression conçues selon des dimensions peuvent avoir une coque épaisse ou fine. Les cuves à coque fine sont destinées à des réservoirs, à des canalisations ou à des chaudières, alors que les cuves à coque épaisse sont destinées aux citernes et aux cylindres à haute pression.

I.1.1. Fabrication

Avec les cuves sous pression, la sécurité opérationnelle est fondamentale. Ainsi, la fabrication et la conception font l'objet de réglementations strictes de la part des autorités en matière d'ingénierie en raison de leur haute propension aux accidents mortels.

Aujourd'hui, la fabrication des cuves sous pression suit les étapes suivantes :

1. Le stock de canalisations brutes doit être inspecté et, après examen, il doit être marqué par un numéro de suivi afin de s'assurer qu'il est possible de surveiller ces derniers tout au long du processus de fabrication.
2. Des examens sont réalisés afin de s'assurer que les parois sont d'une épaisseur minimum et que les matériaux utilisés conservent leur intégrité.
3. Si nécessaire, des opérations de meulage peuvent être utilisées pour éliminer les imperfections ou pour polir la surface intérieure.
4. Les tuyaux sont alors coupés dans la longueur.
5. Un chauffage à induction précis est utilisé pour former les extrémités des tuyaux.
6. Les cuves sont ensuite traitées à la chaleur, à l'intérieur d'un centre calibré et contrôlé.
7. Les cuves subissent un refroidissement liquide afin de garantir que toutes les propriétés physiques soient en concordance avec les réglementations.
8. La solidité est testée et les résultats du processus de traitement à la chaleur sont confirmés.
9. Les extrémités de la cuve sont traitées de manière adaptée.
10. La pression de service, le volume d'eau et le poids sont testés en plus de la vérification du traitement à la chaleur, de l'inspection en vue d'identifier des fuites et des mesures en termes d'élasticité.
11. Après un nettoyage à la vapeur interne afin d'éliminer toute humidité, la surface intérieure est propre et la surface extérieure traitée.
12. À la fin, le revêtement extérieur est achevé selon les spécifications du client et l'unité finale est prête à être envoyée.

I.1.2. Utilisations

Les cuves sous pression peuvent être utilisées dans le secteur privé et dans les secteurs industriels. En termes d'usage domestique, on les retrouve communément utilisées en tant que réservoirs pour stocker de l'eau ou en tant que récepteurs d'air comprimé. Elles sont également utilisées par de nombreuses industries en tant que bouteilles de plongée, tours de distillation, chambres de recompression et réacteurs sous pression.

I.1.3. Utilisation dans le secteur pétrolier et dans le secteur pétrochimique

Les cuves sous pression utilisées dans les raffineries de pétrole et dans les industries pétrochimiques repoussent souvent les limites de conception dans un effort visant à maximiser la production et les utilisations.

Dans l'industrie du raffinage du pétrole, les cuves sous pression sont utilisées dans pléthore de services à des fins multiples.

- Des pièges à condensat peuvent être utilisés pour contenir les condensats provenant des oléoducs. Leur incorporation peut favoriser la séparation efficace des particules solides et des particules liquides.
- Des bouteilles accumulatrices peuvent être utilisées pour les activités pétrolières et gazières offshore.
- Des vaisseaux déshydrateurs peuvent être utilisés pour éliminer des particules infimes provenant de la production de pétrole et du traitement de substances chimiques qui ont été négligées au cours du processus de séparation initial.
- Parmi les autres cuves, on trouve des cuves emballées, des cuves sur plateau, des cuves d'autoclaves, des séparateurs de phases et des cuves de vaisseaux d'absorption de gaz.

I.2. Réservoirs sous pression

I.2.1. Les sphères

Dans ce type de réservoir, et pour ce qui concerne les raffineries, sont stockés sous pression des produits sous phase liquide tels que le propane, le butane, ... Leur rayon est compris entre 5 et 10 m, pour un volume de 500 à 4500 m³. La masse stockée varie selon la densité de la phase de liquide de produit stocké. Pour une sphère de 1000 m³, la masse varie de 400 t (propane) à 700 t (oxyde d'éthylène). La épaisseur de la paroi est toujours supérieure à 10 mm. Ce réservoir doit résister à des pressions internes de 8-9 bars pour le butane jusqu'à 25 bars pour le propane.



Figure I. 1: Cuve sphérique.

I.2.2. Les réservoirs horizontaux

Ce type de réservoirs cylindriques est susceptible de stocker les mêmes produits que les sphères dont il vient d'être question. La majorité « de ces réservoirs présente un diamètre de 1,5 m à 3 m, pour une longueur d'une dizaine de mètres, ce qui correspond à un volume compris entre 100 à 2 000 m³. Les plus longs réservoirs peuvent mesurer quelques dizaines de mètres. Les réservoirs horizontaux sont, dans le cas général, posés sur des berceaux. Il est possible de rencontrer des cas où ils sont ceinturés sur les berceaux.



Figure I. 2: Les réservoirs horizontaux

I.2.3. Réservoirs atmosphériques

Les réservoirs atmosphériques représentent la très grande majorité du parc de réservoirs de grande capacité contenant des liquides inflammables. Ils présentent classiquement un grand diamètre et donc par voie de conséquence un élancement faible. Ils sont constitués d'une unique enveloppe ou d'une double enveloppe métallique. Ces réservoirs sont le plus souvent :

- Métalliques** : leurs fonds, leurs robes et leurs toits sont en acier ;
- Verticaux** : leur axe de symétrie est vertical.



Figure I. 3: Réservoirs atmosphériques

I.3. Le métal utilisé dans la fabrication de la cuve

Masteel fournit des plaques en acier au carbone de haute qualité pour la fabrication de chaudières et de réservoirs sous pression, parfaitement adaptées aux normes élevées fixées par l'industrie pétrolière, gazière et pétrochimique - c'est pourquoi nous stockons une vaste gamme de plaques de carbone selon ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70.

I.3.1. Définition de l'acier

Aciers conçus pour des récipients à pression résistants à la chaleur. Les aciers de qualité A/SA 516 Gr.70 présentent une bonne soudabilité. On les utilise surtout pour fabriquer des chaudières, des récipients à pression et des tubes de transport de liquides chauds. Ils offrent également de bonnes propriétés à basses et hautes températures. L'état de fourniture du produit est en général laminage contrôlé.



Figure I. 4: Acier ASTM A516 G70

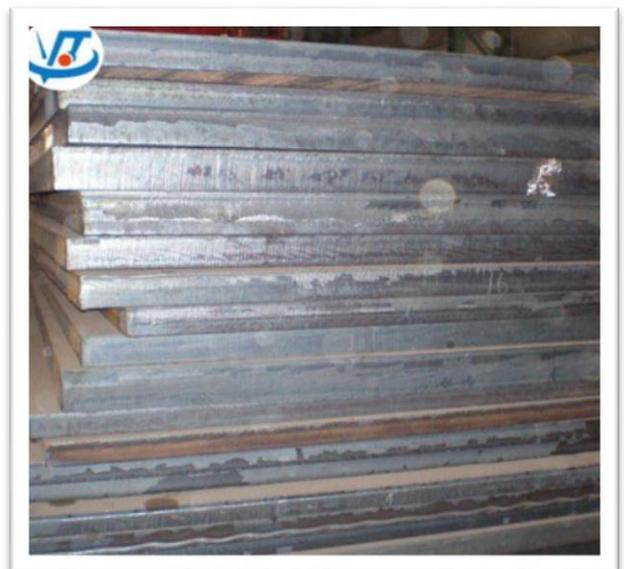


Figure I. 5: Acier ASME Sa516 G70

I.3.2. Certification d'essai en usine de la plaque d'acier au carbone

Les plaques en acier au carbone sont livrées avec la certification de l'usine conformément à EN10204 3.1 ou EN10204 3.2. Nos plaques sont entièrement traçables, généralement avec un estampage dur et nous accueillons toute inspection par un tiers ou un client si nécessaire, qui peut être organisée avec le client.

I.3.3. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Spécifications et normes

Les spécifications et normes des tôles d'acier au carbone ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70 sont décrites dans le tableau 1.

Tableau I. 1: Spécifications et normes équivalentes de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70

La norme	La description
ASTM/ASME	A/SA516-GRADE70
Norme DIN	-
Standard britannique	BS1501-224-490A/B
Norme européenne	EN10028 P355GH

I.3.4. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Composition chimique : [5]

La composition chimique des plaques d'acier au carbone ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70 est indiquée dans le tableau 2.

Tableau I. 2: Composition chimique typique de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70

Composition	Pourcentage %	Composition	Pourcentage %
C	0,10/0,22	Cu	0,3
Si	0,6	Ni	0,3
Mn	1/1,7	Mo	0,08
P	0,03	Nb	0,01
S	0,03	Ti	0,03
Al	0,02	V	0,02
Cr	0,3	-	-

I.3.5. ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des tôles d'acier au carbone ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70 sont décrites dans le tableau 3.

Tableau I. 3: Valeurs mécaniques typiques de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70

Propriété	Valeur
Résistance à la traction (N/mm ²)	510/650
Limite d'élasticité /min (N/mm ²)	335

I.4. Equipement sous Pression

Les équipements sous pression sont des conteneurs étanches déposant un liquide ou un gaz. Les équipements sous pression de diverses tailles et formes ont été produits pour différents objectifs. Généralement, les formes géométriques les plus utilisées sont sphériques, coniques ou cylindriques. Un modèle typique est la combinaison d'un cylindre long avec deux têtes. Les équipements sous pression fonctionnent à des pressions supérieures ou inférieures que la pression atmosphérique. En outre, les températures de fonctionnement de ces systèmes se différencient.

I.4.1. Comment Cela Fonctionne-t-il ?

Les équipements sous pression ont été créés pour fonctionner en parvenant la pression nécessaire/requise afin de créer la fonction d'application comme retenir bouteilles d'air plongées. Ne peuvent fonctionner qu'une fois que la pression requise à leurs bons fonctionnements a été atteinte, comme retenir de l'air dans la bouteille de plongée. Ils peuvent fournir de la pression soit directement à travers les soupapes et en relâchant les jauges, soit indirectement à l'aide du transfert de chaleur. Les niveaux de pression potentielle varient de 15 psi à environ 150 000 psi, tandis que les températures sont souvent supérieures à 400 ° C (750 ° F). Un réservoir sous pression peut contenir de 75 litres (20 gallons) à plusieurs milliers de litres.

I.4.2. Applications des Équipements sous Pression dans L'industrie

Les Équipements sous pression sont utilisés dans de nombreuses industries différentes, mais 3 industries couvrent la majeure partie du marché. Ces industries sont l'industrie pétrolière & gazière, l'industrie chimique et l'industrie énergétique.

I.4.2.1. L'industrie Pétrolière et Gazière

Dans l'industrie pétrolière et gazière, un équipement sous pression est souvent utilisé comme récepteur où les processus physiques et chimiques ont lieu à des températures et des pressions élevées. Bien que les colonnes soient utilisées à des objectifs différentes, leur construction est similaire. Les colonnes de distillation sont utilisées pour diviser les flux d'alimentation ou diviser le flux en plusieurs sources en fonction des points d'ébullition de la partie d'alimentation. En général, les équipements sous pression et les colonnes sont achetés chez les mêmes fabricants en raison de leur processus de construction similaire. L'acier au carbone et l'acier inoxydable sont les deux matériaux les plus couramment utilisés pour la construction dans l'industrie pétrolière et gazière. Un équipement sous pression nécessite également d'autres composants en plus du corps externe pour devenir utilisables, tels que l'appareil interne ou les plateaux de distillation. De tels composants sont très complexes et nécessitent des spécifications très différentes de celles nécessaires à la production d'équipements sous pression fournis par des fournisseurs spécialisés.

I.4.2.2. L'industrie Chimique

Il s'agit d'un équipement sous pression dans lequel un processus (de réactions chimiques) est réalisé, ce qui entraîne un changement fondamental dans le contenu du conteneur. Il peut s'agir de processus tels que la combinaison d'un ou plusieurs produits afin d'en créer un nouveau, ou encore la division d'un produit en plusieurs produits différents, la suppression partielle ou totale d'un produit existant afin d'en créer un autre. De plus, de nombreux types d'équipements sous pression différents peuvent être utilisés simultanément dans l'industrie chimique.

I.4.2.3. L'industrie Energétique

Il existe de nombreuses raisons différentes pour lesquelles le secteur de l'énergie a globalement besoin d'équipements sous pression. L'une des principales raisons est la nécessité de contenir les gaz nocifs dans le secteur de l'énergie. Souvent dans des emplacements tels que les raffineries aussi bien que les excédentaires de la métallurgie. Le gaz a besoin d'être stocké. En outre, les centrales nucléaires utilisent des appareils/équipements sous pression spéciaux appelés "Reactor Pressure Vessels (RPVs)" (Les réacteurs des équipements sous pression.). Les RPV sont de larges appareils cylindriques en acier contenant une carotte (un noyau), de l'eau de refroidissement et de la vapeur générée, qui nécessitent une grande résistance pour résister à des températures et des pressions élevées et à l'irradiation neutronique ce qui fait du RPV la

limite de pression la plus critique dans la centrale nucléaire. Mais n'oubliez pas que tous les réacteurs de puissance n'ont pas d'équipement sous pression.

I.5. Types d'équipement sous Pression

I.5.1. Cuve (réservoir) de Process

Les cuves (réservoirs) de process sont conçues pour contenir, stocker des fluides et sont utilisées pour une opération intégrée dans les installations pétrochimiques, les raffineries, les installations de production de pétrole et de gaz, et d'autres installations.

I.5.2. Autoclaves

Les autoclaves sont de grands récipients qui sont pressurisés et portés à haute température. Ils sont généralement cylindriques, car leur forme arrondie est mieux à même de résister en toute sécurité à des pressions élevées. Les autoclaves sont conçus pour contenir des articles qui sont placés à l'intérieur, puis le couvercle est scellé.

I.5.3. Réservoirs à haute pression

Ce sont les récipients les plus durables du marché, capables de fonctionner sous les charges les plus lourdes et qui offrent la meilleure résistance à la corrosion, à la température et à la pression. Les réservoirs (récipients) à haute pression sont généralement en acier inoxydable.

I.5.4. Fonctions typiques des récipients à haute pression

Mélange à grande vitesse, réacteurs chimiques et systèmes d'extraction supercritiques.

I.5.5. Vase d'expansion

Les vases d'expansion sont conçus pour s'adapter aux changements de la quantité d'eau chaude dans les systèmes de chauffage et aux changements de débit d'eau, et pour maintenir la pression statique produite par la pompe au niveau d'utilisation dans les systèmes d'eau chaude sanitaire.

I.5.6. Echangeurs de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif qui transfère la chaleur d'un milieu à un autre ; c'est l'échangeur de chaleur le plus couramment utilisé dans les installations industrielles telles que la sidérurgie, le pétrole, la pétrochimie, le gaz, les centrales électriques, l'alimentation, les

produits pharmaceutiques, le cuir, les textiles, la climatisation, les navires et les industries maritimes.

I.5.7. Réservoirs d'eau sous pression

Dans un système de puits d'eau, le réservoir sous pression produit une pression d'eau en utilisant de l'air comprimé pour forcer l'eau. En raison de cette pression, l'eau est expulsée du réservoir par les tuyaux à l'intérieur de votre maison lorsqu'une vanne est ouverte.

I.5.8. Réservoirs à vide

Un réservoir à vide fait partie d'un système qui filtre l'air ou les fluides par aspiration, dégazage, pompage ou une combinaison de techniques. Les réservoirs à vide utilisent la pression pour prévenir la contamination, purifier, déshydrater et même alimenter en énergie.

I.5.9. ASME Equipement sous pression

Ils sont également connus sous le nom de ASME chaudières, c'est-à-dire les réservoirs sous pression avec un cachet ASME. Le cachet ASME indique que le réservoir a été inspecté et répond aux normes strictes du code ASME VIII. De plus, le cachet ASME offre aux utilisateurs finaux des informations sur ASME chaudière et son fabricant.

I.5.10. Enveloppe mince sous pression

Un réservoir dont la paroi a une épaisseur bien inférieure à la taille totale du réservoir et qui est soumis à une pression interne bien supérieure à la pression de l'air extérieur.

I.5.11. Chaudières

Ce sont des réservoirs sous pression fermés utilisés pour chauffer des fluides, principalement de l'eau. Ces fluides chauffés sont utilisés pour la cuisine, la production d'électricité, le chauffage central, le chauffage de l'eau et l'assainissement.

I.6. La Production des Equipement sous Pression

I.6.1. La Conception

Scientifiquement, la question de la réduction de la déformation a une simple solution géométrique : une sphère. Mais à ce point, la solution d'ingénierie n'est pas aussi simple. Les équipements sous pression sphériques sont incroyablement difficiles à construire. Bien que la

NASA puisse choisir de construire proprement des réservoirs en fibre de carbone cryogéniques parfaitement sphériques, la plupart des applications nécessitent une solution plus simple et plus réaliste. La forme la plus utilisée est une configuration d'un long cylindre à deux têtes. L'appareil sous pression cylindrique en acier répond aux exigences de diverses applications d'équipements sous pression. Ces appareils sont minutieusement conçus pour favoriser la facilité de production en conservant une géométrie robuste et résiliente.

La section centrale cylindrique peut être facilement construite à partir d'une pièce en acier rectangulaire, en absence de bords perpendiculaires, offre une meilleure répartition de la tension. Alors que les têtes hémisphériques offrent une meilleure répartition de la pression, des têtes superficielles (peu profondes) sont souvent utilisées à leur place. Des têtes superficielles connues sous le nom de têtes "bombées" ou plutôt "la coupelle" dans le secteur. Elles représentent un équilibre important entre la minimisation des contraintes et la fabricabilité. Ces têtes sont plus faciles à former. Elles peuvent devenir plus pleines et atteindre à la même résistance à la pression. En général, les têtes bombées ont une forme de l'une de ces deux géométries : semi-ellipsoïdale ou torisphérique. Les têtes torisphériques sont constituées d'une plaque (une cuvette) à rayon fixe qui se connecte au cylindre avec un joint torique. Les têtes torisphériques sont la forme la plus courante de l'équipement sous pression grâce à leur relative de la facilité de production, trouvant une utilisation dans les chambres de recompressions, les tours de distillation, les usines pétrochimiques et une variété d'utilisations de stockage.

Les têtes semi-elliptiques sont un autre choix utilisé régulièrement. Celles-ci sont plus profondes, plus sphériques et durables qu'une tête torisphérique. C'est pourquoi elles sont plus coûteuses à construire, mais peuvent manier des applications plus difficiles que les têtes torisphériques. Les têtes semi-elliptiques conviennent mieux aux applications avec une pression légèrement plus élevée où la longueur totale du cylindre est toujours importante. Les épaisseurs déterminées par les équations pertinentes en principe sont minimales, auxquelles il convient d'ajouter diverses tolérances qui doivent être appliquées, y compris les tolérances de corrosion et d'érosion, les tolérances d'approvisionnement en matériaux et tout amincissement de fabrication.

I.6.2. Sélection des Matériaux

Le spectre des matériaux utilisés dans les appareils sous pression est vaste et comprend celles-ci :

- L'acier au carbone (avec moins de 0,25% de carbone)
- L'acier au carbone-manganèse (donnant une résistance plus élevée que l'acier au carbone)
- L'acier faiblement allié
- L'acier fortement allié
- L'acier austénitique inoxydable
- Les matériaux non-ferreux (aluminium, cuivre, nickel et alliages)
- Des Matériaux des Boulons Haute Résistance

Afin de se conformer aux normes de production, les propriétés des matériaux suivants doivent être connues dans les matériaux sélectionnés. Les conceptions réalisées, sans connaître ces caractéristiques, sont très probables d'avoir des problèmes lors d'une utilisation prolongée. Par conséquent, on doit choisir des matériaux avec une grande attention.

- Allongement et réduction de la zone à la rupture
- Résistance à l'entaille
- Vieillessement et fragilisation sous conditions de fonctionnement
- La résistance à la fatigue
- La disponibilité

Les contraintes de conception sont ajustées à l'aide de facteurs de sécurité appliqués aux propriétés des matériaux, notamment :

- La limite d'élasticité à la température de conception
- La résistance à la traction ultime à température ambiante
- La résistance à la traction ultime à température ambiante

Les soudeurs et les fabricants doivent garder à l'esprit les points suivants pour garantir que leurs équipements sous pression remplissent toutes les exigences des applications industrielles:

- La corrosion
- Le poids et le contenu d'appareil
- Les températures ambiantes et opérationnelles
- Les pressions statiques et dynamiques
- Les contraintes résiduelles et thermiques
- Les forces de réaction

I.7. Étapes de la Fabrication d'un Equipement sous Pression

Avant de commencer à construire, le fabricant est souvent tenu de soumettre des plans entièrement dimensionnés de l'enveloppe et des composants du réservoir principal sous pression pour approbation par l'acheteur et l'autorité de contrôle. En plus, de montrer les dimensions et les épaisseurs, ces dessins comprennent les informations suivantes :

- Les conditions de conception.
- Les procédures de soudage à appliquer
- Détails des soudures
- Procédures de traitement thermique à appliquer
- Exigences en matière de tests non destructifs
- Tester les pressions

Le fabricant est généralement tenu de maintenir un système positif d'identification des matériaux utilisés dans la construction, afin que tous les matériaux de l'équipement sous pression terminé puissent être retracés jusqu'à leur origine. La création de plaques en rouleaux ou en fonds bombés (coupelle) (selon le matériau, l'épaisseur et les dimensions finies est un processus à chaud ou à froid. La norme régleme les tolérances de montage admissibles. Ces tolérances limitent les contraintes causées par l'arrondi et le désalignement du joint.

I.7.1. Fabrication de Têtes Bombées (les Coupelles) en Acier

La fabrication des têtes bombées (les coupelles) en métal comporte deux étapes principales. Tout d'abord, le métal est découpé à l'épaisseur et à la forme correctes à l'aide de machines de découpe au plasma ou de cisailles circulaires industrielles qui sont généralement guidées par ordinateur. Une fois coupé en forme, le métal est transformé en tête par un procédé de bordage ou de filage. Dans la méthode de filage, le métal est tourné sur un tour hydraulique et pressé sur un outil.

L'outil forme le métal selon la forme de tête souhaitée et permet de produire le rayon de la charnière et le rayon de la cuvette (la coupelle) en une seule fois. Le bridage est un processus en deux étapes modélisées pour accélérer l'assemblage (montage) final du cylindre : L'acier est pressé à froid dans un chapeau façonné, puis formé avec un rouleau de pression afin qu'il présente une bride droite à l'endroit où le cylindre est connecté.

I.7.2. Développement de Réservoirs Composites

Définit 4 types de cylindres composites pour décrire les principes spécifiques de fabrication.

- Type 1 – Métal complet : Cylindre entièrement en métal.
- Type 2 – Cerclage : anneau métallique, recouvert d'un cerclage en fibre de verre. Pour des raisons géométriques, le fond sphérique et la tête d'un cylindre peuvent résister à deux fois la pression de l'enveloppe cylindrique (en supposant une épaisseur de paroi métallique uniforme).
- Type 3 – Entièrement enveloppé, sur un revêtement métallique : Les fibres enveloppées en diagonale rendent la paroi résistante à la pression au niveau du fond et autour du collier métallique. Le revêtement métallique est mince et se trouve à proximité de l'eau du réservoir.
- Type 4 – Un réservoir entièrement en fibre de carbone, avec une isolation en polyamide ou en polyéthylène à l'intérieur du revêtement. Il se caractérise par un poids beaucoup plus faible et une très grande résistance. Le prix de la fibre de carbone est relativement élevé.
- Les cylindres de type 2 et 3 sont apparus vers 1995. Les cylindres de type 4 sont disponibles dans le commerce au moins à partir de 2016.
- Type 2 and 3 cylinders came up around 1995. Type 4 cylinders are commercially available at least from 2016 on.

I.8. Les Procédés de Soudage des Equipements sous Pression

Les équipements sous pression sont utilisés pour le stockage et la distribution à haute pression de liquides et de gaz. La soudure des équipements sous pression doit être d'une qualité exceptionnelle pour résister aux conditions de travail. Une bonne préparation de la surface est essentielle pour passer facilement les premières inspections de soudage d'appareils sous pression et pour protéger l'argent précieux dans le procédé. Il est possible que certaines erreurs se produisent pendant le soudage. Ces erreurs sont mentionnées ci-dessous. Il est courant d'utiliser des tests d'inspection non endommagés pour détecter les imperfections.

La porosité se produit lorsqu'un gaz pénètre dans le bain de soudure en fusion. Lorsque la source se refroidit et se solidifie, le gaz crée des bulles qui apparaissent comme des vides lors de l'inspection. De nombreux problèmes peuvent entraîner une porosité dans une soudure. Il est important de vérifier que les techniques de soudage appropriées sont suivies et que les consommables appropriés sont utilisés.

Les nitrures sont un contaminant très adhérent créé lors du découpage au plasma avec de l'air comprimé ou de l'azote. Ils rendent les bords cassants et créent de la porosité dans certains procédés de soudage, en particulier le soudage à l'arc sous gaz protecteur. Comme les nitrures peuvent exister de 0,005 à 0,010 pouce sous la surface du matériau, il est impossible de les éliminer avec des brosses.

Les inclusions résultent souvent de contaminants de surface qui se mélangent dans le bain de fusion et sont piégés pendant la solidification. Dans les applications de soudure à passes multiples, les scories qui ne sont pas complètement éliminées peuvent être une source d'inclusions. Un nettoyage minutieux à l'aide d'une brosse métallique appropriée avant la soudure et entre les passes est un moyen très efficace d'éliminer ce type de défaut.

L'American Society of Mechanical Engineers (ASME) a établi des règles pour la production des équipements sous pression. Le code de l'ASME Equipements sous pression comprend des détails sur les matériaux, l'assemblage et la sécurité afin de garantir que le procédé de fabrication de l'équipement sous pression répond aux besoins de l'industrie et fonctionnera correctement et sans risque de dommages ou de blessures pour les personnes travaillant à proximité. Les meilleurs travaux de préparation de la soudure et une technique de soudage exceptionnelle sont importants pour la construction d'équipements sous pression sûrs et rentables ainsi que pour la satisfaction de vos clients.

I.8.1. Normes (Standards)

Le code ASME Equipements sous pression (ASME Code) est une norme de premier plan pour les équipements et composants sous pression dans le monde entier et fournit des critères pour la certification des producteurs et l'assurance qualité. Il établit des normes pour la conception, les matériaux, la fabrication, l'inspection, les analyses et le fonctionnement des chaudières et des équipements sous pression (y compris les chaudières de puissance, les chaudières de chauffage, les composants d'installations nucléaires, les réservoirs sous pression en plastique renforcé de fibres et les réservoirs de transport). Dans plus de 100 pays, le code ASME est accepté. L'apposition de la marque de certification ASME sur vos équipements sous pression encourage une plus grande confiance entre vos partenaires commerciaux, les utilisateurs finaux et les autorités.

Respecter les normes et les codes de sécurité : En plus des normes ASME BPVC Section VIII qui régit la conception et la fabrication des équipements sous pression, les utilisateurs

d'équipements sous pression doivent adhérer aux normes et codes de sécurité tels que OSHA (Occupational Safety and Health Administration) 1915 Subpart K pour les équipements et conteneurs, API 510 Vessel Code pour la maintenance, la réparation et la modification et API 572 pour l'inspection. Les agences d'inspection autorisées par les juridictions locales régissent et réglementent les inspections et les installations.

Permettre au personnel formé de manier les équipements sous pression : il est essentiel que seul le personnel qualifié soit autorisé à manier (manutentionner) les équipements, en raison du facteur de risque élevé lié à la manutention des équipements sous pression.

I.8.2. Inspection et Analyses

Pendant la construction, chaque équipement sous pression doit être inspecté par l'autorité de contrôle. La norme définit les étapes de la réception des matériaux jusqu'à l'achèvement de l'équipement pour lesquelles l'inspection par cette autorité est obligatoire. Par exemple, le client peut exiger une inspection supplémentaire pour vérifier les éléments internes.

Le fabricant spécifie les procédures de soudure utilisées dans la construction de l'équipement sous pression ainsi que les éprouvettes qui sont indicatives des matériaux et des épaisseurs utilisés dans l'équipement réel. L'autorité de contrôle doit généralement observer la création et les analyses de ces pièces de contrôle, à moins que des pièces de contrôle préalablement authentifiées ne soient disponibles.

Les soudeurs doivent passer des tests d'agrément destinés à montrer qu'ils sont capables de réaliser des soudures identiques à celles utilisées dans l'équipement réel. Une autorité d'agrément reconnue réaffirme ces autorisations pour les soudeurs.

La norme nationale détermine le niveau de contrôle non destructif appliqué pendant la construction. Habituellement, les tests non destructifs sont l'un ou plusieurs des suivants.

- Le contrôle par particules magnétiques ou par ressuage (pour les défauts de surface de la soudure).

Le ressuage ne détecte que les discontinuités qui se trouvent en surface, tandis que la magnétoscopie détecte non seulement les fissures de surface, mais aussi les imperfections qui sont très proches de la surface.

- Radiographie (pour les défauts internes des soudures).

La radiographie permet de détecter des fissures et des inclusions dans le sous-sol, mais elle est incroyablement coûteuse. Habituellement, seule la radiographie est utilisée pour les soudures critiques, comme dans les centrales nucléaires et les sous-marins.

- Ultrasons (pour les défauts internes des soudures).

Les contrôles par ultrasons permettent de détecter les imperfections de surface et de sous-sol. Ils sont effectués en dirigeant une onde sonore à haute fréquence à travers le métal et la soudure.

Le degré de contrôle non destructif dépend du matériau et de l'épaisseur (c'est-à-dire de la difficulté de la soudure). Certaines normes utilisent une approche de « facteur de joint » qui permet de réduire le nombre de contrôles non destructifs si l'épaisseur prévue est augmentée. Ce facteur commun est choisi et appliqué lors de la phase de conception initiale.

Avant la distribution, la plupart des normes exigent un test de pression en présence de l'autorité d'inspection. Comme elle ne peut pas être comprimée, l'eau est le liquide de test privilégié. Si l'air est le seul liquide à tester possible, des précautions particulières doivent être prises et des consultations avec l'autorité d'inspection et d'autres organismes d'application de la loi concernés sont nécessaires. La contrainte de pression de test est généralement de 1,2 à 1,5 fois la pression de calcul, qui est appliquée progressivement et est maintenue pendant une période de temps déterminée pour démontrer l'adéquation du pot.

Lors de la distribution et de la mise en service, le client accepte la responsabilité d'un service sûr. La législation peut également exiger une inspection périodique pendant la durée de vie de l'équipement et peut nécessiter l'intervention de l'autorité réglementaire pour certains contenus essentiels.

I.9. Conclusion

Pour résumer, de nombreux critères sont importants pour choisir la chaudière à pression qui convient le mieux à votre propre procédé. Tout d'abord, toutes les conditions du procédé doivent être bien connues. De cette façon, il est possible de concevoir la chaudière la mieux adaptée au procédé et de choisir le matériau le plus approprié. Toutefois, même si toutes ces étapes se déroulent correctement, il peut être nécessaire de vérifier toutes les étapes de la production par des contrôles non destructifs après la phase de production. Il ne faut pas oublier d'effectuer une maintenance pendant un certain temps après le début de l'utilisation de l'équipement sous pression. Il convient de noter qu'une chaudière à pression fabriquée selon

les normes est plus sûre. Les normes reconnues dans de nombreux pays à cet égard ont été établies par l'ASME.

CHAPITRE II :
Théorie de conception d'une
cuve sous pression

II.1. Introduction

Conformément à la section VIII du code ASME, les récipients sous pression sont des conteneurs pour le confinement de la pression, interne ou externe. Cette pression peut être obtenue à partir d'une source externe ou par l'application de chaleur à partir d'une source directe ou indirecte, ou toute combinaison de celles-ci.

La section VIII du code ASME est un code de construction pour les récipients sous pression et contient des exigences obligatoires, des interdictions spécifiques et des conseils non obligatoires pour les matériaux, la conception, la fabrication, l'examen, l'inspection, les tests et la certification des récipients sous pression.

II.1.1. Sections du code

- I. Chaudières électriques
- II. Matériaux
- III. Règles de construction des composants des installations nucléaires
- IV. Chaudières de chauffage
- V. Examen non destructif
- VI. Règles recommandées pour l'entretien et le fonctionnement des chaudières de chauffage
- VII. Directives recommandées pour l'entretien des chaudières électriques
- VIII. Récipients à pression
- IX. Qualifications en soudage et brasage
- X. Récipients à pression en plastique renforcé de fibres
- XI. Règles pour l'inspection en service des composants des centrales nucléaires

II.2. Base des critères de conception

II.2.1. Fabricant d'appareils sous pression ASME Section VIII, Division 1

Les critères sont principalement basés sur une formule qui a un facteur de sécurité intégré. Cette section est la plus largement utilisée et ne nécessite pas d'analyse détaillée des contraintes plus élevées ou plus localisées qui existent généralement. Les contraintes sont dans la plage de sécurité par des facteurs de sécurité intégrés. Le gradient de température n'est normalement pas pris en compte dans cette section. La théorie des contraintes maximales est la base de la conception.

II.2.2. ASME Section VIII, Division 2

Les critères de la section VIII, division 2 sont des règles alternatives et nécessitent la prise en compte des contraintes locales, du gradient de température et des pressions cycliques, etc. Généralement, des valeurs de contrainte inférieures sont autorisées et des épaisseurs de paroi plus minces en résultent en raison d'une analyse plus détaillée. La théorie de la contrainte de cisaillement maximale est la base principale de la conception.

II.2.3. ASME Section VIII, Division 3

Pour la conception d'un récipient sous pression avec une pression de conception élevée (> 10 000 psig), une analyse des fractures est nécessaire.

II.2.4. ASME Section I et Section VIII – fondamentaux

Les formules des sections I et VIII de l'ASME sont utilisées pour déterminer l'épaisseur minimale requise et la pression de conception de la tuyauterie, des tubes, des fûts et des collecteurs en utilisant le fonctionnement maximal autorisé Pression (MAWP). Cependant, le paragraphe UG-31 stipule que ces formules peuvent également être utilisées pour calculer l'épaisseur de paroi des tubes et tuyaux sous pression interne.

II.2.5. Conception

La section I du code de chaudière ASME, ainsi que la section VIII, exigent un bout longitudinal et circonférentiel articulations à examiner par radiographie complète.

Lorsque la conception de la cuve est requise, joint longitudinal soudé bout à bout, la coque cylindrique aura un facteur d'efficacité conjoint ($E = 1,0$). Ce facteur correspond à un facteur de sécurité (ou qualité du matériau facteur) de 3,5 dans le métal-mère.

II.2.6. Valeurs de contraintes maximales admissibles des réservoirs sous pression

Les valeurs de contrainte maximales admissibles à utiliser dans le calcul de l'épaisseur de la paroi sont données dans le code ASME pour de nombreux matériaux différents. Ces valeurs de contraintes sont fonction de la température.

Tableau II. 1: Valeurs de contraintes maximales admissibles des réservoirs sous pression

Valeur de contrainte maximale admissible pour les aciers communs				
Matériel	Type	Classe	Devisions 1 -20°F à 650°F	Devisions 2 -20°F à 650°F
Acier Carbone Plaques et Feuilles	SA-516	Classe 55	13800	18300
		Classe 60	15000	20000
		Classe 65	16300	21700
		Classe 70	17500	23300
	SA-285	Classe A	11300	15000
		Classe B	12500	16700
		Classe C	13800	18300
	SA-36		12700	16900
	SA-203	Classe A	16300	21700
		Classe B	17500	23300
		Classe D	16300	21700
		Classe E	17500	23300
SA-240	Classe 304	11200	20000	
	Classe 304L	-	16700	
	Classe 316	12300	20000	
	Classe 316L	10200	16700	

II.3. Conditions de calcul

Pression de calcul : 2.0000 MPa
 Fond statique : 0.0000 MPa
 Matériau de la robe: SA-516 Gr.70
 Longueur de la robe :6000.00 mm
 Compressive contrainte : 100.73 mpa
 Surépaisseur de corrosion: 1.00 mm
 Surépaisseur de corrosion externe : 0.00 mm
 Diamètre extérieur (nouveau) : 2000.00 mm
 Diamètre extérieur (corrodé) : 2000.00 mm
 Surface de la robe : 37.70 m²
 Volume estimé de la robe : 18.25 m³
 Efficacité des joints circulaires : 100%

Température de calcul :60°c
 Efficacité long de joint de soudure:100%
 Diagramme du facteur B: CS-2
 Contrainte du matériaux (chaud) :138.00 mpa
 Contrainte du matériaux (froid) : 138.00 mpa
 Contrainte de compression : 100.73 mpa
 Contrainte du circonférentiel réel :132.53 mpa
 Contrainte du longitudinale réelle : 65.24 mpa
 Allongement extrême du fibre : 0.81%
 Gravité spécifique : 1.00
 Poids de fluide : 18251.20 Kg
 Poids total de la robe remplis : 22888.49 Kg

II.3.1. Données de température minimale de conception

Courbe de température minimale : B pressionat MDMT : 2.0000 MPa

USC-66(b) réduction : Non température minimale calculée : -10°C

II.3.2. Calculs D'épaisseur De Conception

II.3.2.1. Calculs De Contraintes Longitudinales Par Paragraphe UG-27(C)(2)

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{(2 \times 985)}{(2 * 138 * 1) + (0.4 * 2)} = 7.12 + 1_{(corrosion)} + 0.00_{(ext.corrosion)} \\
 &= \text{le minimum of } 8.12 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Calcul de contrainte circonférentielle par appendice1-1 (a)(1)

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{(2 \times 1000)}{(138 * 1) + (0.4 * 2)} = 14.41 + 1_{(corrosion)} + 0.00_{(ext.corrosion)} \\
 &= \text{le minimum of } 15.41 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Les charges externes ne contrôlent pas la conception

Épaisseur de robe nominale choisis = 16.00 mm

II.4. Information Sur La Conception Du Fond Elliptique

Pression de conception : 2.0000 MPa

température de conception : 60°C

Fond statique : 0.0000 MPa efficacité de joint : 100%

Matériau du fond : SA-516 Gr.70 diagramme du facteur B : CS-2

Contrainte (chaud) : 138.00 MPa

Épaisseur de corrosion : 1.00 mm

Contrainte (froid) : 138.00 MPa

Épaisseur de corrosion externe : 0.00 mm

Contrainte du fond réelle : 131.53 MPa

Emplacement du fond : droite bride droite : 50.00 mm

Diamètre extérieur : 2000.00 mm

profondeur du fond : 508.00 mm

Épaisseur : 0.00 mm

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{d}{2\Box} \right)^2 \right] : 1.00$$

Allongement extrême de la fibre : 3.56 %

Surface de la tête : 4.60 m² gravité spécifique : 1.00

Volume estimé de la tête : 1.15 m³ poids de fluide : 1149.83 Kg

Poids du fond : 570.67 Kg

poids total du fond remplies : 1720.49 Kg

II.4.1. Données De Température Minimale De Conception

Courbe de température minimale : B pression (at MDMT) : 2.0000 MPa

USC-66(b) réduction : Non

température minimale de calcul du métal : -10°C

USC-68(b) réduction : Non

température minimale calculée : -15°C

II.4.1.1. Calculs des épaisseurs APPENDIX1-4 (c)

$$\begin{aligned} t &= \frac{PD_0K}{2SE + 2P(K - 0.1)} = \frac{(2 \times 2000 * 1)}{(2 * 138.* 1) + 2(1 - 0.1)} \\ &= 14.13 + 1_{(corrosion)} + 0.00_{(ext.corrosion)} + 0.00_{(épaisseur)} \\ &= \text{le minimum of } 15.31 \text{ mm} \end{aligned}$$

Épaisseur du fond minimum choisis = 16.00 mm

La résistance de la soudure est adéquate.

II.5.1.1. Epaisseur De Coque Requise Par Paragraphe

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{(2 \times 1000)}{(138 * 1) + (0.4 * 2)} = 14.41mm$$

Les charges externes ne contrôlent pas la conception

II.5.1.2. Calculs D'épaisseur De Tuyau Requis

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{(2 \times 239)}{(138 * 1) - (0.6 * 2)} = 3.49mm$$

II.5.1.3. Facteurs De Réduction De La Force

$$t_{r1} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1\right) = \min\left(\frac{138}{138}, 1\right) = 1$$

$$t_{r2} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1\right) = \min\left(\frac{138}{138}, 1\right) = 1$$

$$t_{r3} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1\right) = \min\left(\frac{138}{138}, 1\right) = 1$$

$$t_{r4} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1\right) = \min\left(\frac{138}{138}, 1\right) = 1$$

II.5.1.4. UG-45 Calculs D'épaisseur

Épaisseur du tuyau pour le chargement de la pression (plus la corrosion) par paragraphe

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2 \times 239)}{(138 * 1) - (0.6 * 2)} + 1 + 0.00 = 4.49 mm$$

Épaisseur du tuyau pour la pression interne (plus corrosion à chaque paragraphe

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2 \times 1000)}{(138 * 1) + (0.4 * 2)} + 1 + 0.00 = 15.41mm$$

Épaisseur minimale du tuyau mural standard (plus corrosion) par paragraphe

t=épaisseur minimale du tuyau mural standard +C_a+ext.C_a = 9.33 mm

Épaisseur minimale du tuyau par paragraphe

$t = \text{le plus petit UG-45(b)(1) or UG-45(b)(4)} = 9.33 \text{ mm}$

Épaisseur du mur = $t_n = 16.00$ est supérieur ou égal à UG-45 valeur 9.33

II.5.2. Calculs De Renforcement Des Tubulures

$$A = d t_r F + 2 t_n t_r F (1 - f_{r1}) = (478.00 * 14.41 * 1.00) + (2 * 15.00 * 14.41 * 1.00 * (1 - 1.0000)) = 6887.98 \text{ sq.mm}$$

Surface disponible-pression interne

$$A1 \text{ formule 1} = d (E1 t - F t_r) - 2t_n (E1 t - F t_r) (1 - f_{r1}) = 478.00 * (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) - 2 * 15.00 * (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) * (1 - 1.0000) = 282.02 \text{ sq.mm}$$

$$A1 \text{ formule 2} = 2(t + t_n) (E1 t - F t_r) - 2t_r (E1 t - F t_r) (1 - f_{r1}) = 2 * (15.00 + 15.00) (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) - 2 * 15.00 * (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) * (1 - 1.0000) = 35.40 \text{ sq.mm}$$

$$A1 = \text{plus grande valeur de A1 formule et A1 formule 2} = 282.02 \text{ sq.mm}$$

$$A2 \text{ formule 1} = 5(t_n - t_m) f_{r2} t = 5(15.00 - 3.49) * 1.0000 * 15.00 = 863.25 \text{ sq.mm}$$

$$A2 \text{ formule 2} = 2(t_n - t_m) f_{r2} (2.5 t_n + t_e) = 2(15.00 - 3.49) * 1.0000 * (2.5 * 15.00 + 16.00) = 1231.57 \text{ sq.mm}$$

$$A2 = \text{plus petite valeur de A2 formule 1 et A2 formule 2} = 863.25 \text{ sq.mm}$$

A3 = plus petite valeur de ce qui suit :

$$5 * t_i * f_{r2} = 15.00 * 14.00 * 1.0000 = 1050.00 \text{ sq.mm}$$

$$5 * t_i * f_{r2} = 14.00 * 14.00 * 1.0000 = 980.00 \text{ sq.mm}$$

$$2 * h * t_i * f_{r2} = 61.00 * 14.00 * 1.0000 = 1708.00 \text{ sq.mm} = 980.00 \text{ sq.mm}$$

$$A41 = (\text{pied})^2 * f_{r3} = (8.57)^2 * 1.0000 = 73.47 \text{ sq.mm}$$

$$A42 = (\text{pied})^2 * f_{r4} = (10.71)^2 * 1.0000 = 114.80 \text{ sq.mm}$$

$$A43 = (\text{pied})^2 * f_{r2} = (8.57)^2 * 1.0000 = 73.47 \text{ sq.mm}$$

$$A5 = (D_p - d - 2t_n) t_e f_{r4} = (790.00 - 478.00 - 2 * 1500) * 16.00 * 1.0000 = 4512.00 \text{ sq.mm}$$

Surface disponible (pression interne) = $A1 + A2 + A3 + A41 + A42 + A43 + A5 = 6898.98 \text{ sq.mm}$
qui est supérieur à A (6887.98).

II.5.3. Force De Soudure De Tuyau Par Paragraphe UW-16 (Etat Corrodé)

Souder 41 $t_{\min} = \text{le plus petit de } 19.300 ; t_e ; \text{ au } t_n = \text{le plus petit de } 19.00 ; 16.00 \text{ au } 15.00 = 15.00 \text{ mm}$

$$\text{Souder 41 pieds min} = \frac{\text{le plus petit de } 6.00 \text{ au } (t_{\min} * 0.7) + \text{ext.CA}}{0.7} = \frac{6.00}{0.7} = 15.00 \text{ mm}$$

Souder 41 de soudure réelle = 8.57 mm

Souder 42 t_{min} = le plus petit de 19.00 ; t au t_e = le plus petit de 19.00 ; 15.00 au 16.00
= 15.00 mm

$$\text{Souder 42 pieds min} = \frac{0.5 \cdot t_{min} + \text{ext.CA}}{0.7} = \frac{0.5 \cdot 15.00 + 0.00}{0.7} = 10.71 \text{ mm}$$

Souder 42, de soudure réelle = 10.71 mm

Souder 43 t_{min} = le plus petit de 19.00 ; t au t_n = le plus petit de 19.00 ; 15.00 au 15.00
= 15.00 mm

$$\text{souder 43 pied min} = \frac{\text{le plus petit de 6.00 au } (t_{min} \cdot 0.7) + \text{ext.CA}}{0.7} =$$

$$\frac{\text{le plus petit de 6.00 au } (15.00 \cdot 0.7) + 1.00}{0.7} = \frac{7.00}{0.7} = 10.00 \text{ mm}$$

Souder 43 ; de soudure réelle = 10.00 mm

II.5.4. Contrainte Unitaire Par Paragraphe UG-45 Et UW-15

Paroi du tuyau en cisaillement = $0.7 \cdot 138.00 = 96.60$ MPa

Soudure d'angle supérieur 41 en cisaillement = $0.49 \cdot \text{contrainte du matériel}$

$$= 0.49 \cdot 138.00 = 67.62 \text{ MPa}$$

Soudure de rainure de cuve en tension = $0.74 \cdot \text{contrainte du matériel} = 0.74 \cdot 138.00$

$$= 102.12 \text{ MPa}$$

Soudure d'angle intérieure 43 en cisaillement = $0.49 \cdot \text{contrainte du matériel} = 0.49 \cdot 138.00$

$$= 67.62 \text{ MPa}$$

Soudure d'angle extérieur 42 en cisaillement = $0.49 \cdot \text{contrainte du matériel} = 0.49 \cdot 138.00$

$$= 67.62 \text{ MPa}$$

Soudure répand rainure en tension = $0.74 \cdot \text{contrainte du matériel} = 0.74 \cdot 138 = 102.12$ MPa

II.5.5. Force Des Éléments De Connexion

Paroi du tuyau en cisaillement = $1/2 \cdot \pi \cdot \text{diamètre moyen de la tuyau} \cdot t_n \cdot \text{paroi du tuyau}$

$$\text{dans l'effort de cisaillement} = 1/2 \cdot \pi \cdot 493.00 \cdot 15.00 \cdot 96.60 = 1121500 \text{ N.}$$

Filet supérieur en cisaillement = $1/2 \cdot \pi \cdot \text{tuyau OD} \cdot \text{souder de pied} \cdot \text{filet supérieur dans la}$

$$\text{contrainte de l'unité de} = 1/2 \cdot \pi \cdot 508.00 \cdot 8.57 \cdot 67.62 = 462300 \text{ N.}$$

Rainure de soudure en tension = $1/2 \cdot \pi \cdot \text{tuyau OD} \cdot \text{résistance à la traction de la rainure}$

$$= 1/2 \cdot \pi \cdot 508.00 \cdot 16.00 \cdot 102.12 = 1303100 \text{ N.}$$

Filet intérieur en cisaillement = $1/2 \cdot \pi \cdot \text{tuyau OD} \cdot \text{souder de pied} \cdot \text{filet interne dans la}$

$$\text{contrainte de l'unité} = 1/2 \cdot \pi \cdot 508.00 \cdot 8.57 \cdot 67.62 = 462200 \text{ N.}$$

Filet extérieur en = $1/2 \cdot \pi \cdot \text{plate OD} \cdot \text{souder de pied} \cdot \text{filet extérieur dans la contrainte de}$

$$\text{l'unité} = 1/2 \cdot \pi \cdot 790.00 \cdot 10.71 \cdot 67.62 = 898600 \text{ N.}$$

repad groove weld = $1/2 * \pi * \text{nozzle OD} * \text{groove depth} * \text{repad groove weld in tension unit stress}$
 $= 1/2 * \pi * 508.00 * 16.00 * 102.12 = 1303100 \text{ N.}$

II.5.6. Charge A Supporter Par Les Soudures, Conformément A La Norme UG-41 (B)

(1) De La Norme UG-41.1 (A)

$w = [A - A1 + 2t_n f_r1 (E_{1t} - F_{tr})] * S_v = [6887.98 - 282.02 + 2 * 15.00 * 1.0000 * (1.00 - 15.00 - 1.00 * 14.41)]$
 $= 914100 \text{ N.}$

$w_{1-1} = (A2 + A5 + A41 + A42) * S_v = (863.25 + 4512.00 + 73.47 + 114.80) * 138.00 = 767800 \text{ N.}$

$w_{2-2} = (A2 + A3 + A41 + A43 + 2t_n t f_r1) * S_v =$
 $(863.25 + 980.00 + 73.47 + 73.44 + 2 * 15.00 * 1.00) * 138.00 = 336700 \text{ N.}$

$w_{3-3} = (A2 + A3 + A5 + A41 + A42 + A43 + 2t_n f_r1) * S_v =$
 $(863.25 + 980.00 + 4512.00 + 73.47 + 114.80 + 73.44 + 2 * 15.00 * 15.00 * 1.0000) * 138.00 = 975200 \text{ N.}$

II.5.7. Verifier Les Chemins De Force

path 1-1 : outer fillet in shear + nozzle wall in shear = $898600 + 1121500 = 2020100 \text{ N}$

path 2-2 = upper fillet in shear + repad groove weld + groove weld in tension + inner fillet in shear = $462300 + 1303100 + 1303100 + 462200 = 3530700 \text{ N.}$

path 3-3 : outer fillet shear + inner fillet in shear + groove weld in tension =
 $898600 + 462200 + 1303100 = 2663900 \text{ N.}$

plate strength = $A5 * S_p = 4512.00 * 138.00 = 622656 \text{ N.}$

la résistance de la soudure d'angle externe (898600) est supérieure à la résistance de la plaque (622656).

II.6. Épaisseur de coque requise selon le paragraphe UG-37 (a)

$$t = \frac{PR_0}{SE + 0.4P} = \frac{(2.0000 * 1.0000)}{(138.00 * 1.00) + (0.4 * 2.0000)} = 14.41 \text{ mm}$$

II.6.1. Calculs d'épaisseur de tuyau requis

Épaisseur de tuyau requise pour le pré-paragraphe interne

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{(2.0000 * 239.00)}{(138.00 * 1.00) - (0.6 * 2.0000)} = 3.49 \text{ mm}$$

Facteurs De Réduction De La Force

$$f_{r1} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1.0000\right) = \min\left(\frac{138.00}{138.00}, 1.0000\right) = 1$$

$$f_{r2} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1.0000\right) = \min\left(\frac{138.00}{138.00}, 1.0000\right) = 1$$

$$f_{r3} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1.0000\right) = \min\left(\frac{138.00}{138.00}, 1.0000\right) = 1$$

$$f_{r4} = \min\left(\frac{S_n}{S_v}, 1.0000\right) = \min\left(\frac{138.00}{138.00}, 1.0000\right) = 1$$

II.6.2. Calculs d'épaisseur UG-45

Épaisseur du tuyau pour le chargement sous pression (plus corrosion) selon le paragraphe UG-45 (a)

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2.0000 * 239.00)}{(138.00 * 1.00) - (0.6 * 2.0000)} + 1 + 0.00 = 4.49 \text{ mm}$$

Épaisseur du tuyau pour la pression interne (plus corrosion) par paragraphe) UG-45 (b) (1)

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2.0000 * 1000.00)}{(138.00 * 1.00) + (0.4 * 2.0000)} + 1 + 0.00 = 15.41 \text{ mm}$$

Épaisseur min du tuyau de paroi standard (plus corrosion selon le paragraphe UG-45(b) (4)

$$t = \text{épaisseur minimale du tuyau mural standard} + C_a + ext. C_a = 9.33 \text{ mm}$$

Épaisseur minimale du tuyau par paragraphe UG-45(b)

$$t = \text{le plus petit des UG-45 (b) (4)} = 9.33 \text{ mm.}$$

Épaisseur du mur = $t_n = 16.00$ est supérieur ou égal à la valeur UG-45 de 9,33

Calculs de renforcement des tuyaux

$$A = d t_r F + 2 t_n t_r F (1 - f_{r1}) = (478.00 * 14.41 * 1.00) + (2 * 15.00 * 14.41 * 1.00 * (1 - 1.0000)) = 6887.98 \text{ sq.mm}$$

Surface disponible-pression interne

$$A1 \text{ formule 1} = d (E1 t - F t_r) - 2 t_n (E1 t - F t_r) (1 - f_{r1}) = 478.00 * (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) - 2 * 15.00 * (1.00 * 15.00 - 1.00 * 14.41) * (1 - 1.0000) = 282.02 \text{ sq.mm}$$

$$A1 \text{ formule 2} = 2(t+t_n) (E1 t - F t_r) - 2t_r (E1 t - F t_r) (1-f_r1) = 2*(15.00+15.00)(1.00*15.00 - 1.00*14.41) - 2*15.00*(1.00*15.00 - 1.00*14.41)*(1-1.0000) = 35.40 \text{ sq.mm}$$

$$A1 = \text{plus grande valeur de A1 formule et A1 formule 2} = 282.02 \text{ sq.mm}$$

$$A2 \text{ formule 1} = 5(t_n - t_m) f_r2 t = 5(15.00-3.49) * 1.0000 * 15.00 = 863.25 \text{ sq.mm}$$

$$A2 \text{ formule 2} = 2(t_n - t_m) f_r2 (2.5 t_n + t_e) = 2(15.00-3.49) * 1.0000 * (2.5*15.00+16.00) = 1231.57 \text{ sq.mm}$$

$$A2 = \text{plus petite valeur de A2 formule 1 et A2 formule 2} = 863.25 \text{ sq.mm}$$

A3 = plus petite valeur de ce qui suit :

$$5*t*t_i*f_r2 = 15.00*14.00*1.0000 = 1050.00 \text{ sq.mm}$$

$$5*t_i*t_i*f_r2 = 14.00*14.00*1.0000 = 980.00 \text{ sq.mm}$$

$$2*h*t_i*f_r2 = 61.00*14.00*1.0000 = 1708.00 \text{ sq.mm}$$

$$= 980.00 \text{ sq.mm}$$

$$A41 = (\text{pied})^2 * f_r3 = (8.57)^2 * 1.0000 = 73.47 \text{ sq.mm}$$

$$A42 = (\text{pied})^2 * f_r4 = (10.71)^2 * 1.0000 = 114.80 \text{ sq.mm}$$

$$A43 = (\text{pied})^2 * f_r2 = (8.57)^2 * 1.0000 = 73.47 \text{ sq.mm}$$

$$A5 = (D_p - d - 2t_n) t_e f_r4 = (790.00 - 478.00 - 2*1500) * 16.00 * 1.0000 = 4512.00 \text{ sq.mm}$$

Surface disponible (pression interne) = A1+A2+A3+A41+A42+A43+A5 = 6898.98 sq.mm
qui est supérieur à A (6887.98).

II.6.3. Force de soudure de tuyau par paragraphe UW-16 (état corrodé)

Souder 41 t min = le plus petit de 19.300 ; t_e ; au t_n = le plus petit de 19.00 ; 16.00 au 15.00 = 15.00 mm

$$\text{Souder 41 pieds min} = \frac{\text{le plus petit de } 6.00 \text{ au } (t_{min} * 0.7) + \text{ext.CA}}{0.7} = \frac{6.00}{0.7} = 15.00 \text{ mm}$$

Souder 41 de soudure réelle = 8.57 mm

Souder 42 tmin = le plus petit de 19.00 ; t au t_e = le plus petit de 19.00 ; 15.00 au 16.00 = 15.00 mm

$$\text{Souder 42 pieds min} = \frac{0.5*t_{min} + \text{ext.CA}}{0.7} = \frac{0.5*15.00 + 0.00}{0.7} = 10.71 \text{ mm}$$

Souder 42, de soudure réelle = 10.71 mm

Souder 43 tmin = le plus petit de 19.00 ; t au t_n = le plus petit de 19.00 ; 15.00 au 15.00 = 15.00 mm

$$\text{souder 43 pied min} = \frac{\text{le plus petit de } 6.00 \text{ au } (t_{\text{min}} * 0.7) + \text{ext.CA}}{\text{le plus petit de } 6.00 \text{ au } (15.00 * 0.7) + 1.00} = \frac{0.7}{0.7} = 10.00 \text{ mm}$$

Souder 43 ; de soudure réelle = 10.00 mm

II.6.4. Contrainte unitaire par paragraphe UG-45 et UW-15

Paroi du tuyau en cisaillement = $0.7 * 138.00 = 96.60 \text{ MPa}$

Soudure d'angle supérieur 41 en cisaillement = $0.49 * \text{contrainte du matériel}$
 $= 0.49 * 138.00 = 67.62 \text{ MPa}$

Soudure de rainure de cuve en tension = $0.74 * \text{contrainte du matériel} = 0.74 * 138.00$
 $= 102.12 \text{ MPa}$

Soudure d'angle intérieure 43 en cisaillement = $0.49 * \text{contrainte du matériel} = 0.49 * 138.00$
 $= 67.62 \text{ MPa}$

Soudure d'angle extérieur 42 en cisaillement = $0.49 * \text{contrainte du matériel} = 0.49 * 138.00$
 $= 67.62 \text{ MPa}$

Soudure repand rainure en tension = $0.74 * \text{contrainte du matériel} = 0.74 * 138.00$
 $= 102.12 \text{ MPa}$

II.6.5. Force des éléments de connexion

Paroi du tuyau en cisaillement = $1/2 * \pi * \text{diamètre moyen de la tuyau} * t_n * \text{paroi du tuyau dans l'effort de cisaillement} = 1/2 * \pi * 493.00 * 15.00 * 96.60 = 1121500 \text{ N}$.

Filet supérieur en cisaillement = $1/2 * \pi * \text{tuyau OD} * \text{souder de pied} * \text{filet supérieur dans la contrainte de l'unité de} = 1/2 * 508.00 * 8.57 * 67.62 = 462300 \text{ N}$.

Rainure de soudure en tension = $1/2 * \pi * \text{tuyau OD} * \text{résistance à la traction de la rainure} = 1/2 * \pi * 508.00 * 16.00 * 102.12 = 1303100 \text{ N}$.

Filet intérieur en cisaillement = $1/2 * \pi * \text{tuyau OD} * \text{souder de jambe} * \text{filet interne dans la contrainte de l'unité} = 1/2 * \pi * 508.00 * 8.57 * 67.62 = 462200 \text{ N}$.

Filet extérieur en = $1/2 * \pi * \text{plate OD} * \text{souder de pied} * \text{filet extérieur dans la contrainte de l'unité} = 1/2 * 790.00 * 10.71 * 67.62 = 898600 \text{ N}$.

repad groove weld = $1/2 * \pi * \text{nozzle OD} * \text{groove depth} * \text{repad groove weld in tension unit stress} = 1/2 * \pi * 508.00 * 16.00 * 102.12 = 1303100 \text{ N}$.

II.6.6. Charge A Supporter Par Les Soudures, Conformément A La Norme UG-41 (b) (1) de la norme UG-41.1 (a)

$$w = [A-A1+2t_n f_r1(E_{1r}-F_{1r})] * S_v = [6887.98-282.02+2*15.00*1.0000*(1.00-15.00-1.00*14.41)] = 914100 \text{ N.}$$

$$w_{1-1} = (A2+A5+A41+A42) * S_v = (863.25+4512.00+73.47+114.80) * 138.00 = 767800 \text{ N.}$$

$$w_{2-2} = (A2+A3+A41+A43+2t_n t f_r1) * S_v = (863.25+980.00+73.47+73.44+2*15.00*1.00)*138.00 = 336700 \text{ N.}$$

$$w_{3-3} = (A2+A3+A5+A41+A42+A43+2t_n f_r1) * S_v = (863.25+980.00+4512.00+73.47+114.80+73.44+2*15.00*1.0000)*138.00 = 975200 \text{ N.}$$

II.6.7. Verifier Les Chemins De Forces

$$\text{path 1-1: outer fillet in shear + nozzle wall in shear} = 898600 + 1121500 = 2020100 \text{ N}$$

$$\text{path 2-2 = upper fillet in shear + repad groove weld + groove weld in tension + inner fillet in shear} = 462300+1303100+1303100+462200 = 3530700 \text{ N.}$$

$$\text{path 3-3: outer fillet shear + inner fillet in shear + groove weld in tension} = 898600+462200+1303100 = 2663900 \text{ N.}$$

$$\text{plate strength} = A5 * S_p = 4512.00 * 138.00 = 622656 \text{ N.}$$

La résistance de la soudure d'angle externe (898600) est supérieure à la résistance de la plaque (622656).

II.7. Épaisseur De Coque Requisite Selon Le Paragraphe UG-37 (a)

$$t = \frac{PR_0}{SE + 0.4P} = \frac{(2.0000 * 1.0000)}{(138.00 * 1.00) + (0.4 * 2.0000)} = 14.41 \text{ mm}$$

II.7.1 Calculs D'épaisseur De Tuyau Requis

Épaisseur de tuyau requise pour le pré-paragraphe interne

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{(2.0000 * 23.00)}{(138.00 * 1.00) - (0.6 * 2.0000)} = 0.34 \text{ mm}$$

II.7.2. Épaisseur De La Tuyau Pour Le Chargement Sous Pression (Plus Corrosion) Selon Le paragraphe UG-45 (a)

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2.0000 * 23.00)}{(138.00 * 1.00) - (0.6 * 2.0000)} + 1.00 + 0.00 = 1.34 \text{ mm}$$

II.7.3. Epaisseur De La Tubulure Pour La Pression Interne (plus corrosion) par paragraphe UG-45 (b) (1) :

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_a + ext. C_a = \frac{(2.0000 * 1000.00)}{(138.00 * 1.00) + (0.4 * 2.0000)} + 1.00 + 0.00 = 15.41 \text{ mm}$$

II.7.4. Epaisseur Minimale Du Tuyau De Paroi Standard (plus corrosion) selon le paragraphe UG-45(b)(4)

$$t = \text{épaisseur minimale du tuyau mural standard} + C_a + ext. C_a = 5.80 \text{ mm}$$

II.7.5. Epaisseur Minimale De La Tubulure Par Paragraphe UG-45(b)

$t =$ le plus petit des UG-45 (b) (4) = 5.80mm.

Épaisseur du mur = $t_n = 15.00$ est supérieur ou égal à la valeur UG-45 de 5,80

II.8. Epaisseur requise de la bride hôte

$$tr = G * \sqrt{\frac{CP}{SE} + \frac{1.9W_{m1} \square G}{SE G^3}} = 559.00 * \sqrt{\frac{0.3000 * 2.0000}{138.00 * 1} + \frac{1.9 * 667864 * 63.4000}{138.00 * 1 * 559.00^3}} = 49.01 \text{ mm}$$

II.8.1. Calculs d'épaisseur de tuyau requis

II.8.1.1. Epaisseur de tuyau requis pour la pression interne par paragraphe UG-37(a)

$$trn = \frac{PRn}{SE * 0.6P} = \frac{2.0000 * 23.00}{138.00 * 1 - 0.6 * 2.0000} = 0.34 \text{ mm}$$

II.8.1.2. Epaisseur De La Tuyau (Plus La Corrosion) Par Paragraphe UG-45 (a)

$$t = \frac{PRn}{SE * 0.6P} + C_a + ext. C_a = \frac{2.0000 * 23.00}{138.00 * 1 - 0.6 * 2.0000} + 1.00 + 0.00 = 1.34 \text{ mm}$$

II.8.2. Epaisseur De La Tuyau Pour La Pression Interne (plus la corrosion) par paragraphe UG-45

$$\begin{aligned}
 tr &= G * \sqrt{\frac{CP}{SE} + \frac{1.9W_{m1} \square G}{SE G^3}} + Ca + ext. Ca \\
 &= 559.00 * \sqrt{\frac{0.3000}{138.00 * 1} + \frac{1.9 * 667864 * 63.4000}{138.00 * 1 * 559.00^3}} + 1.00 + 0.00 \\
 &= \mathbf{50.01mm}
 \end{aligned}$$

II.8.3. Epaisseur requise de la bride hôte

$$tr = G * \sqrt{\frac{CP}{SE} + \frac{1.9W_{m1} \square G}{SE G^3}} = 559.00 * \sqrt{\frac{0.3000 * 2.0000}{138.00 * 1} + \frac{1.9 * 667864 * 63.4000}{138.00 * 1 * 559.00^3}} = \mathbf{49.01 mm}$$

II.8.3.1. Epaisseur de tuyau requis pour la pression interne par paragraphe UG-37(a)

$$trn = \frac{PRn}{SE * 0.6P} = \frac{2.0000 * 78.50}{138.00 * 1 - 0.6 * 2.0000} = \mathbf{1.15mm}$$

Chapitre III :
Conception et simulation
d'une cuve sous pression
SolidWorks

III.1. Le logiciel SolidWorks Le logiciel de CAO SolidWorks

Est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises. Le présent document explique les concepts et la terminologie de l'application SolidWorks et a pour but de vous familiariser avec les fonctionnalités les plus utilisées de SolidWorks



III.1.1. Concepts

Les pièces constituent les éléments de base du logiciel SOLIDWORKS. Les assemblages contiennent des pièces ou d'autres assemblages, appelés des sous-assemblages. Un modèle SOLIDWORKS est constitué de géométrie 3D qui définit ses arêtes, faces et surfaces. Le logiciel SOLIDWORKS vous permet de concevoir rapidement des modèles précis. Les modèles SOLIDWORKS sont : • basés sur la modélisation 3D • basés sur les composants

III.2. Différents composants de la cuve

- Virole
- Virole droite
- Virole gauche
- Fond 2000 elliptique droite
- Fond 2000 elliptique gauche
- Berceau
- Anneau de levage 1
- Anneau de levage 2
- Bride 1
- Bride type 2
- Skid

III.3. Conception des composants de la cuve

III.3.1. Présentation de virole

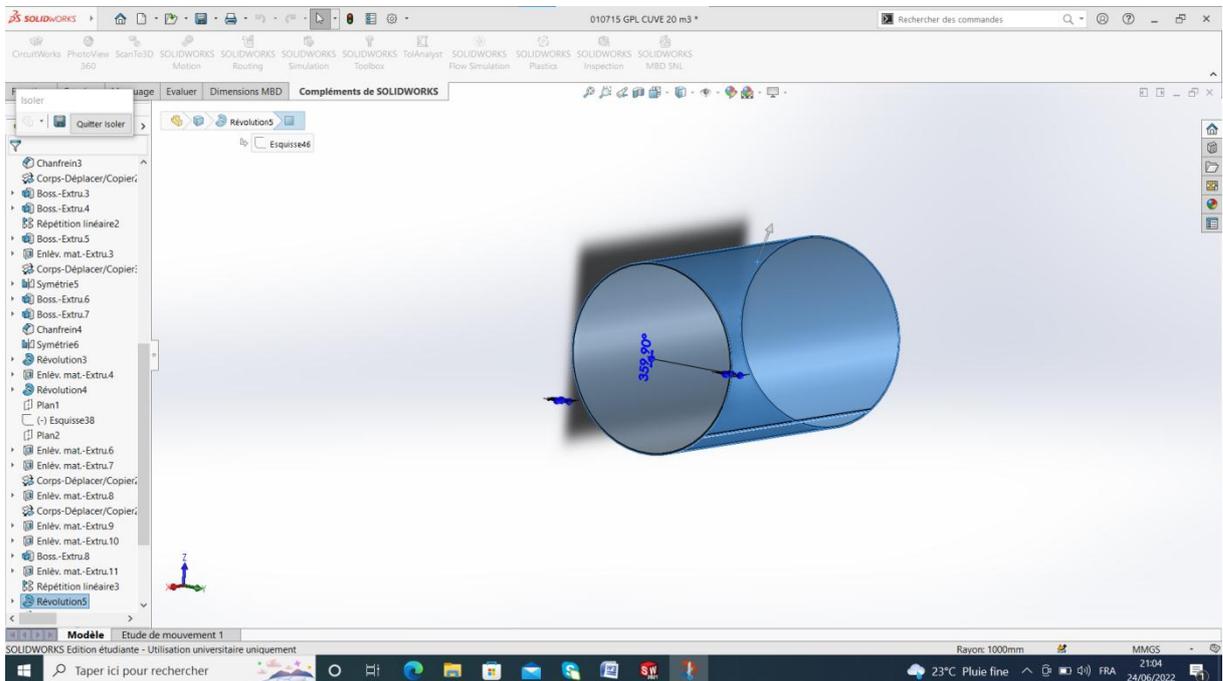


Figure III. 1: Interface graphique de virole sous-SolidWorks.

III.3.2. Présentation de virole droite-gauche

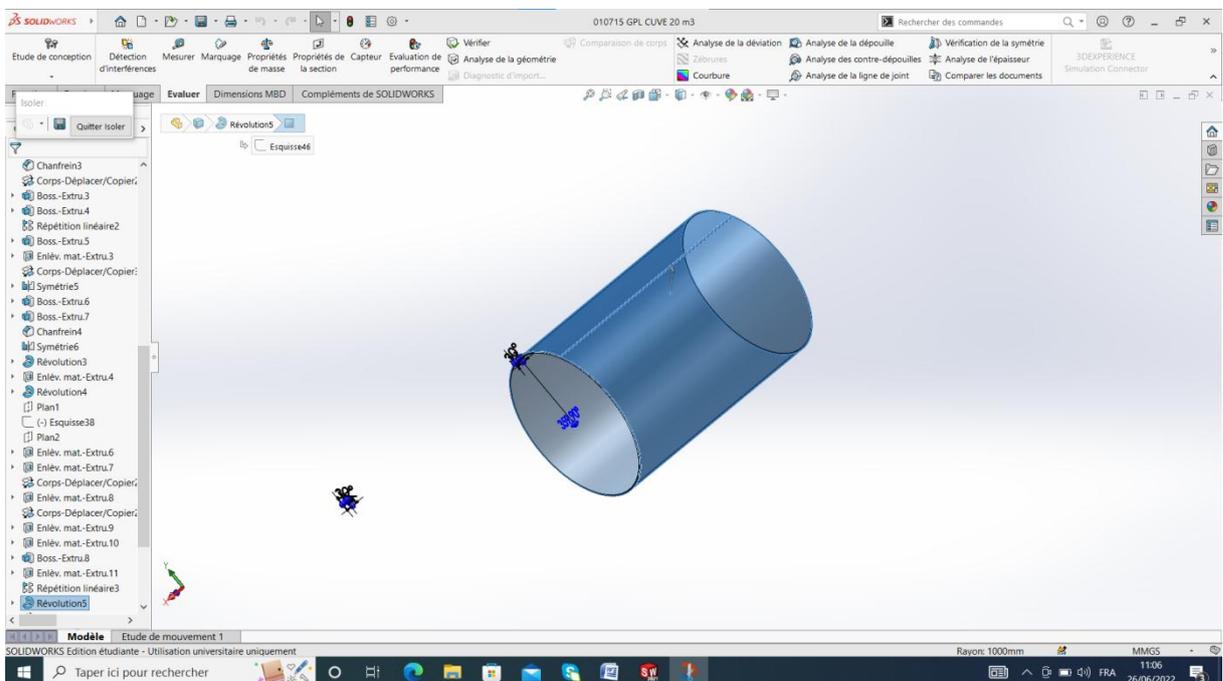


Figure III. 2: Interface graphique de virole droite- gauche sous-SolidWorks.

III.3.3. Présentation des fonds 1

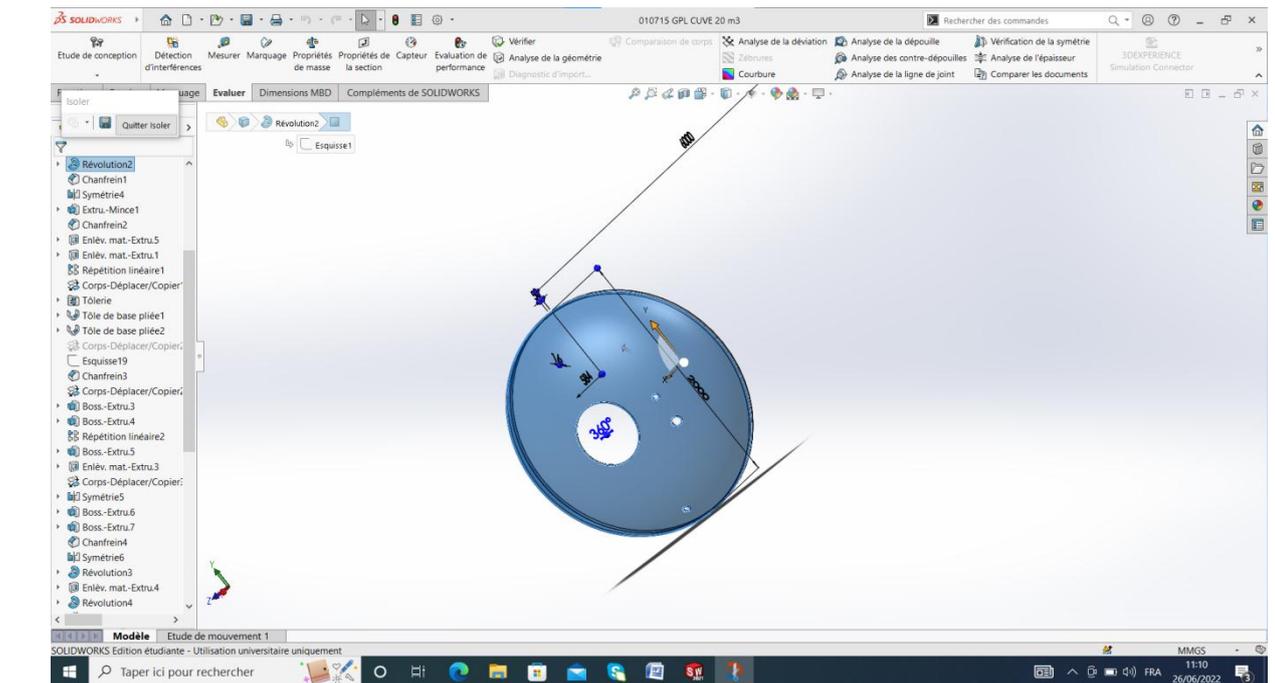


Figure III. 3: Interface graphique du fonds elliptique droite sous SolidWorks.

III.3.4. Présentation des fonds 2

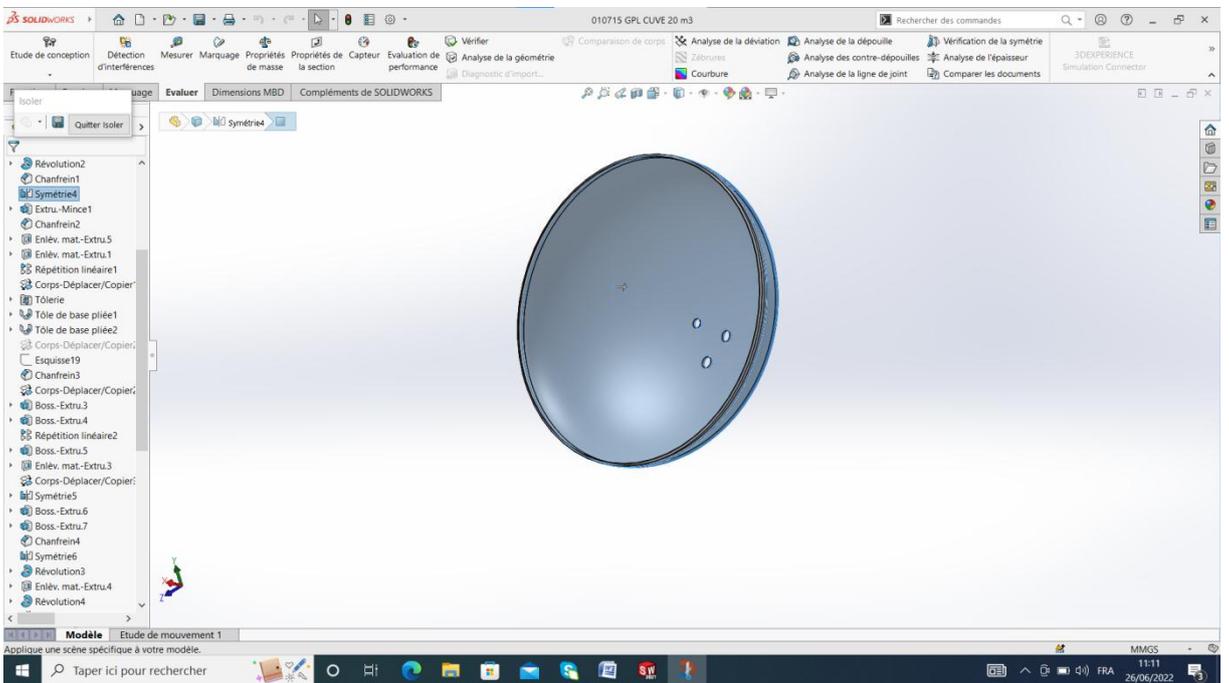


Figure III. 4: Interface graphique du fonds elliptique gauche sous SolidWorks.

III.3.5. Présentation de berceau

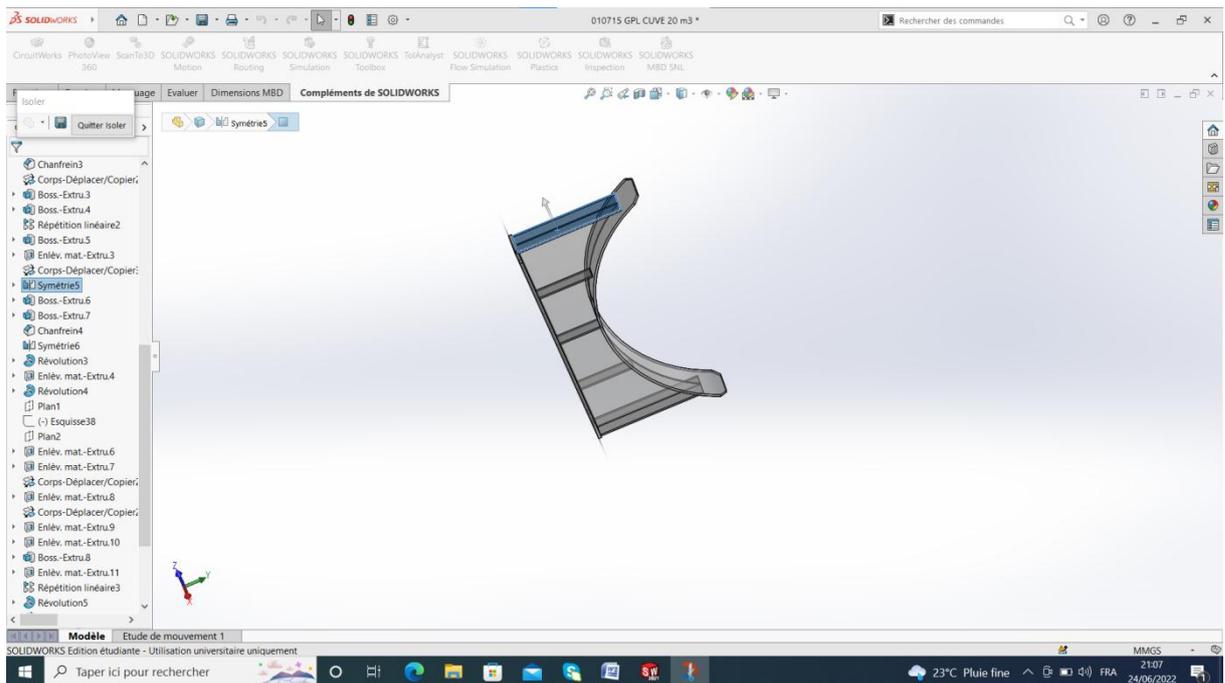


Figure III. 5: Interface graphique de berceau sous SolidWorks.

III.3.6. Présentation d'anneau de levage 1

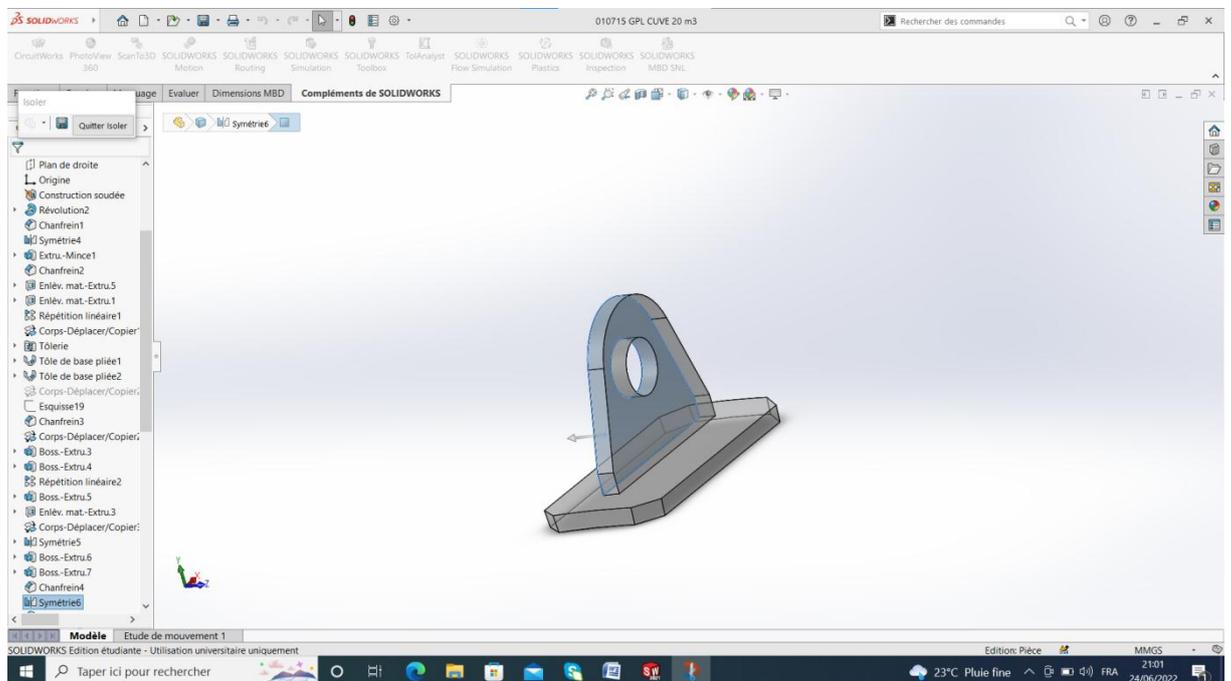


Figure III. 6: Interface graphique d'anneau de levage1 sous SolidWorks.

III.3.7. Présentation d'anneau de levage 2

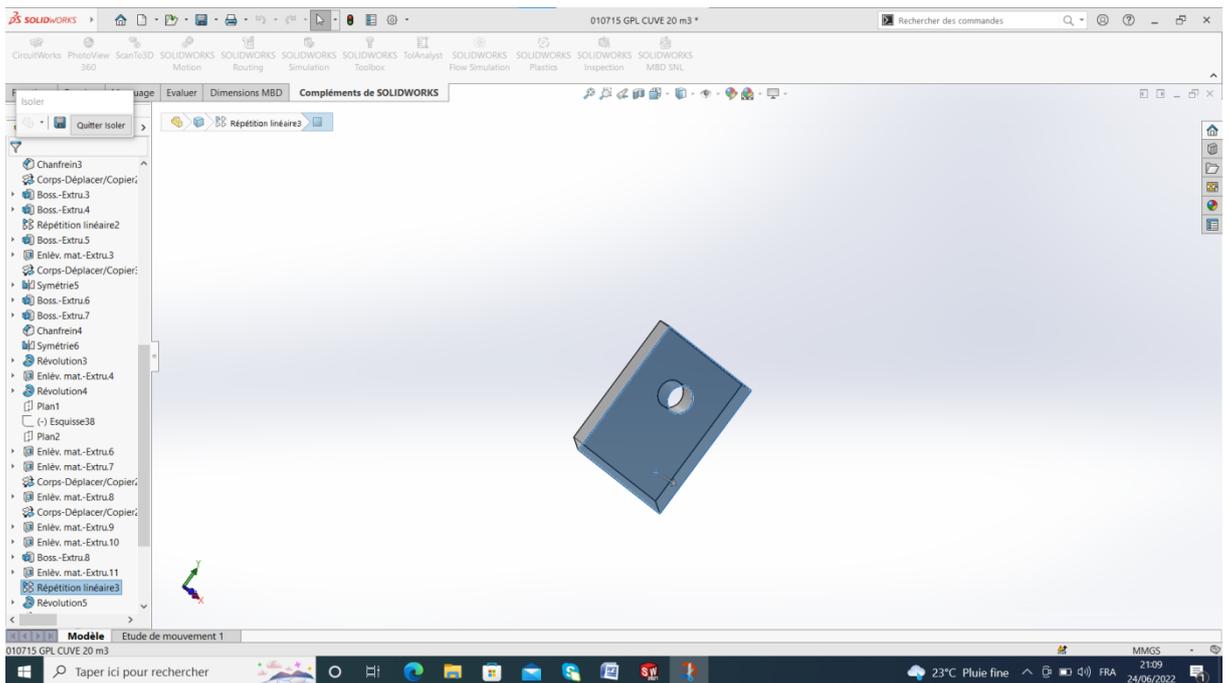


Figure III. 7: Interface graphique d'anneau de levage 2

III.3.8. Présentation de bride 1

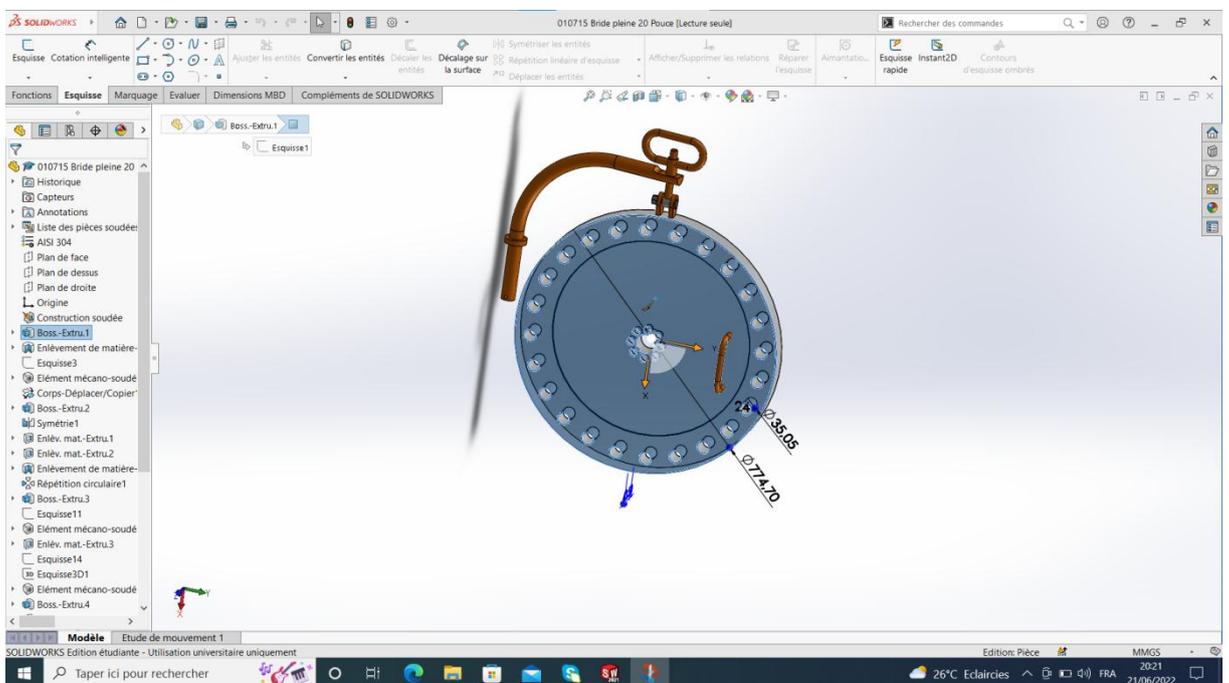


Figure III. 8: Interface graphique de bride 1

III.3.9. Présentation de union d 120

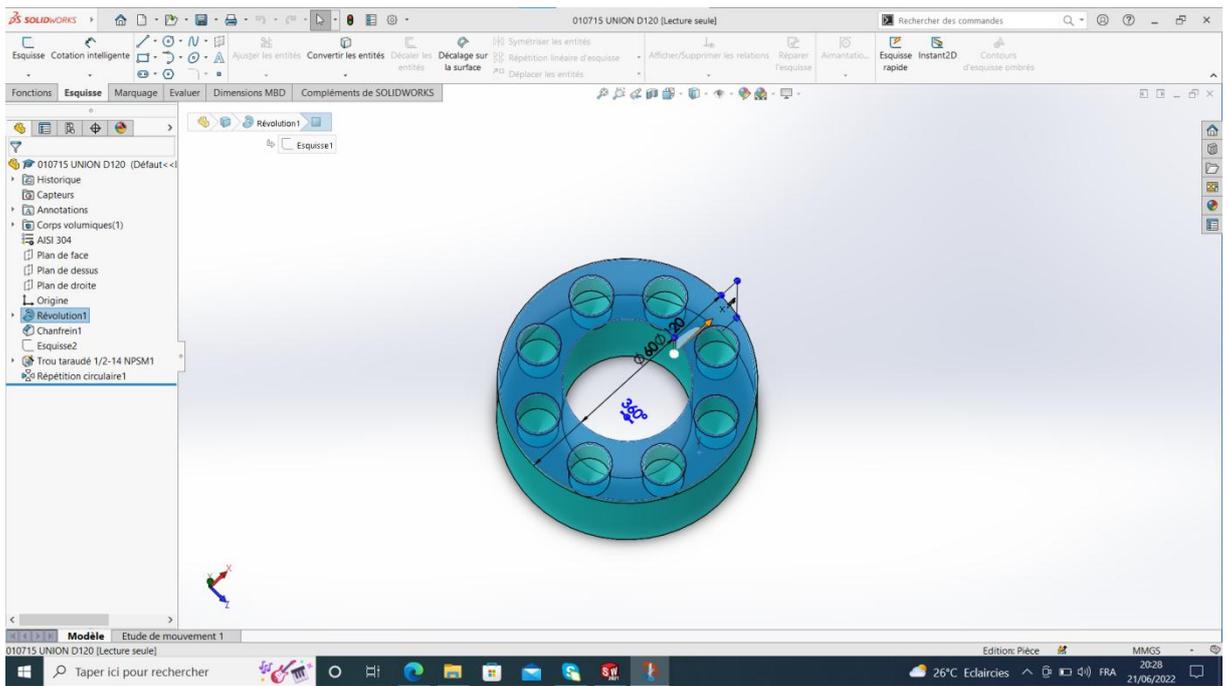


Figure III. 9: Interface graphique de union d 120

III.3.10. Présentation de union vis

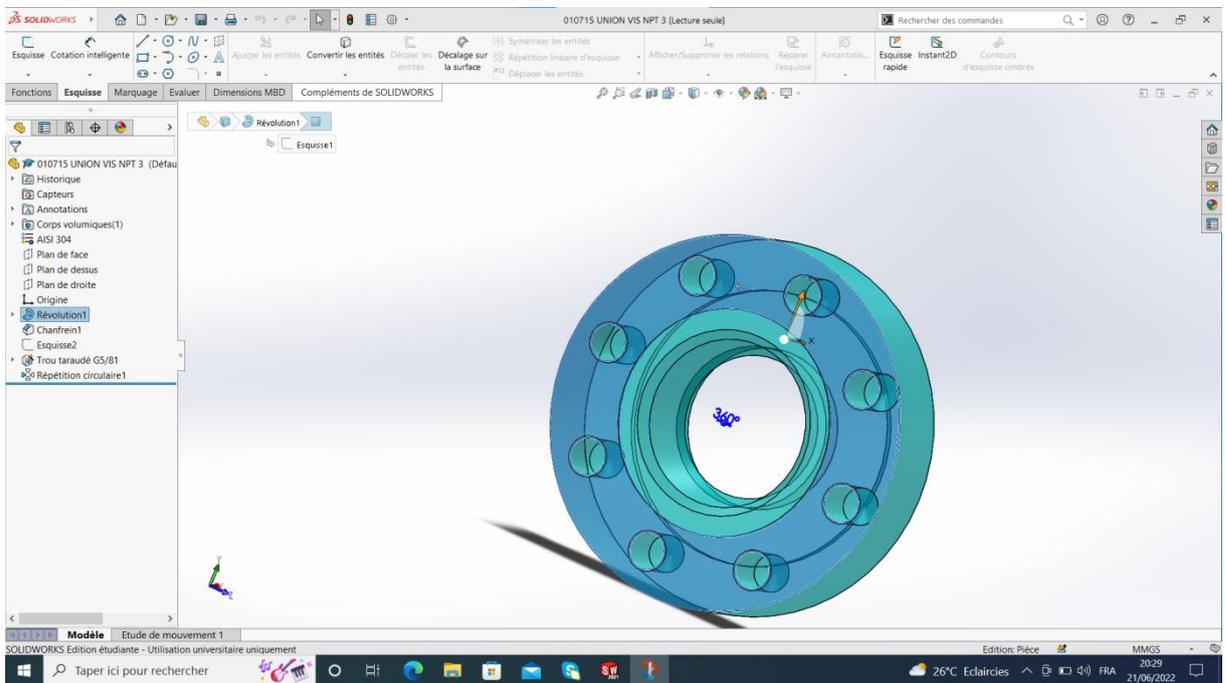


Figure III. 10: Interface graphique de union vis

III.3.11. Présentation tubulure remplissage

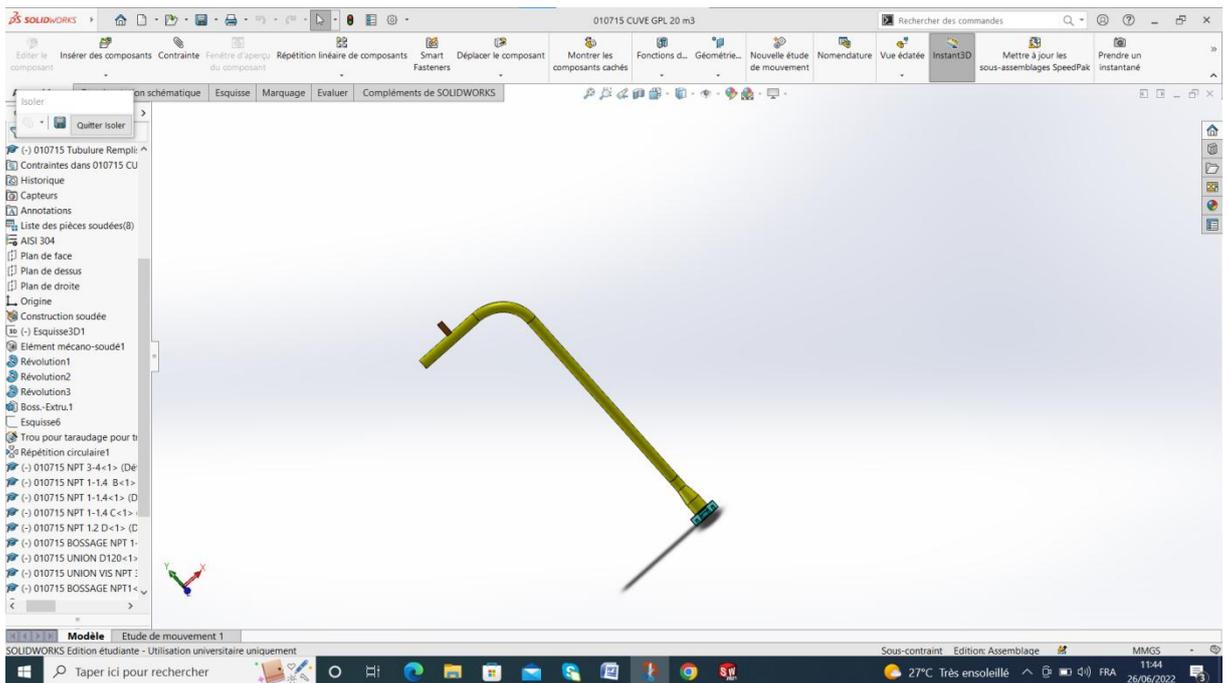


Figure III. 11: Interface graphique tubulure remplissage

III.3.12. Présentation npt

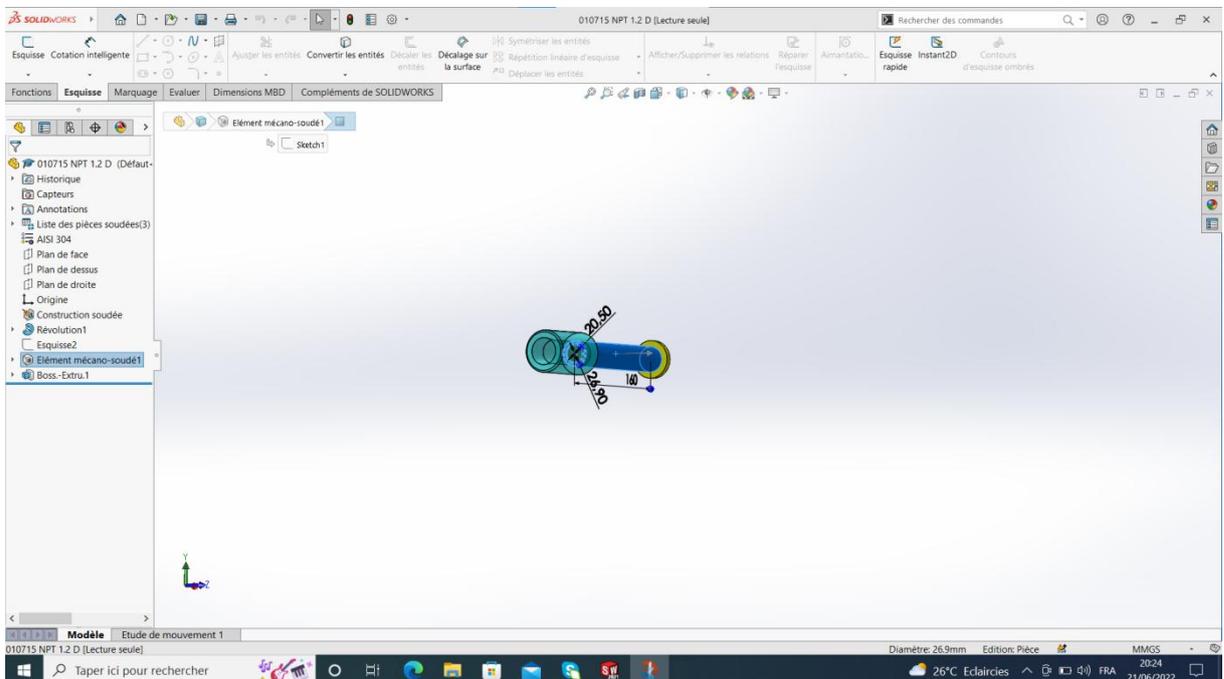


Figure III. 12: Interface graphique npt 1

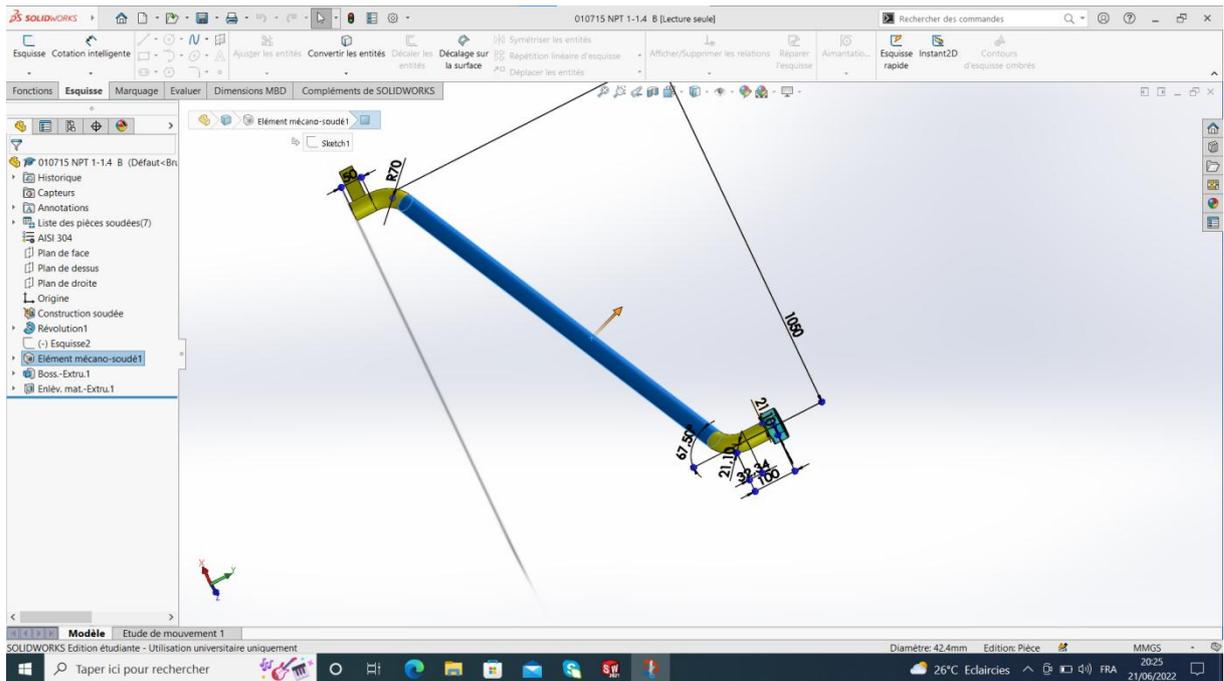


Figure III. 13: Interface graphique npt 2

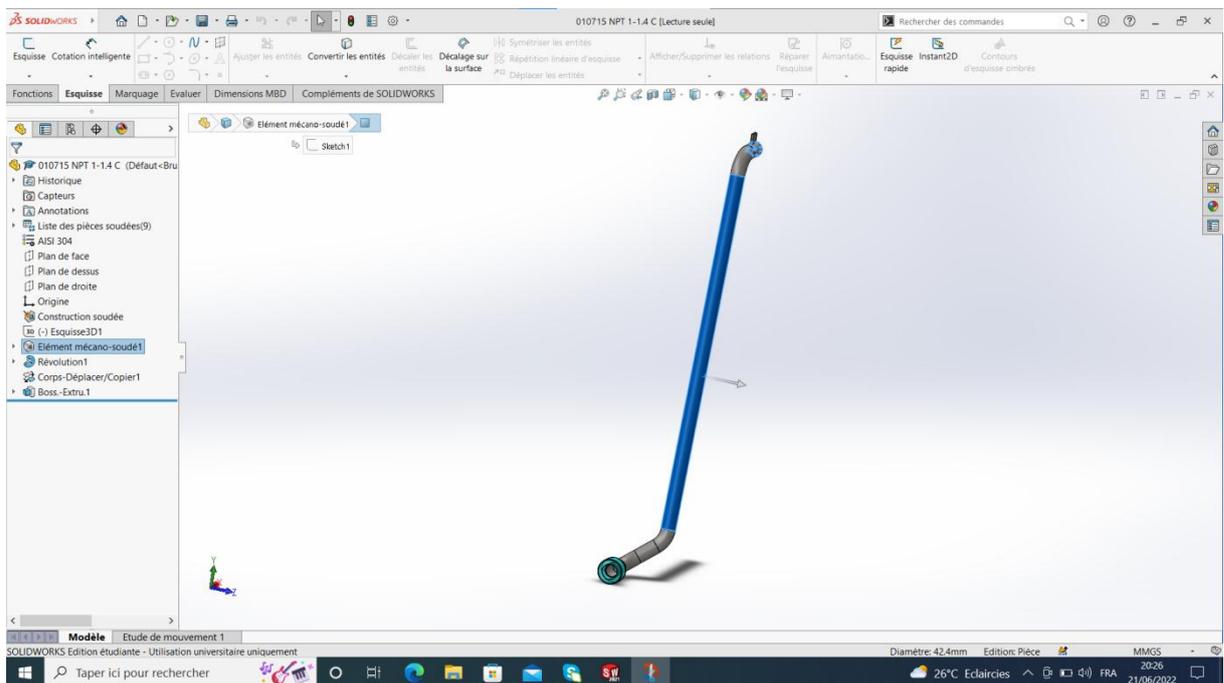


Figure III. 14: Interface graphique npt 3

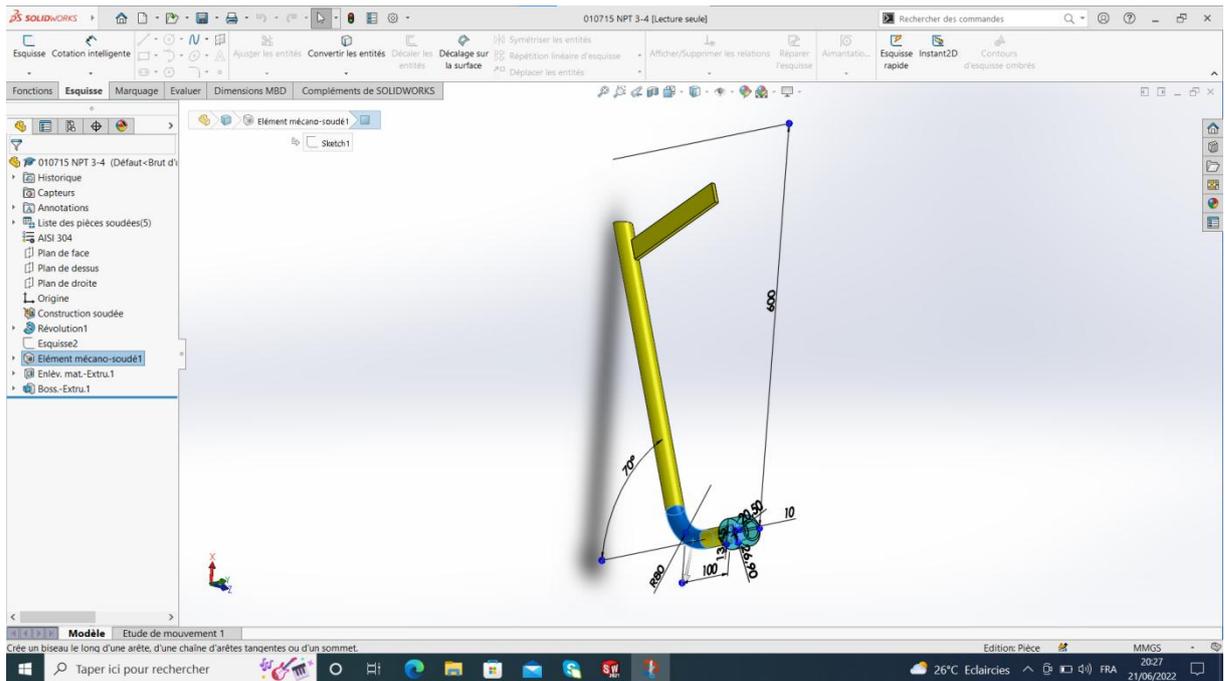


Figure III. 15: Interface graphique npt

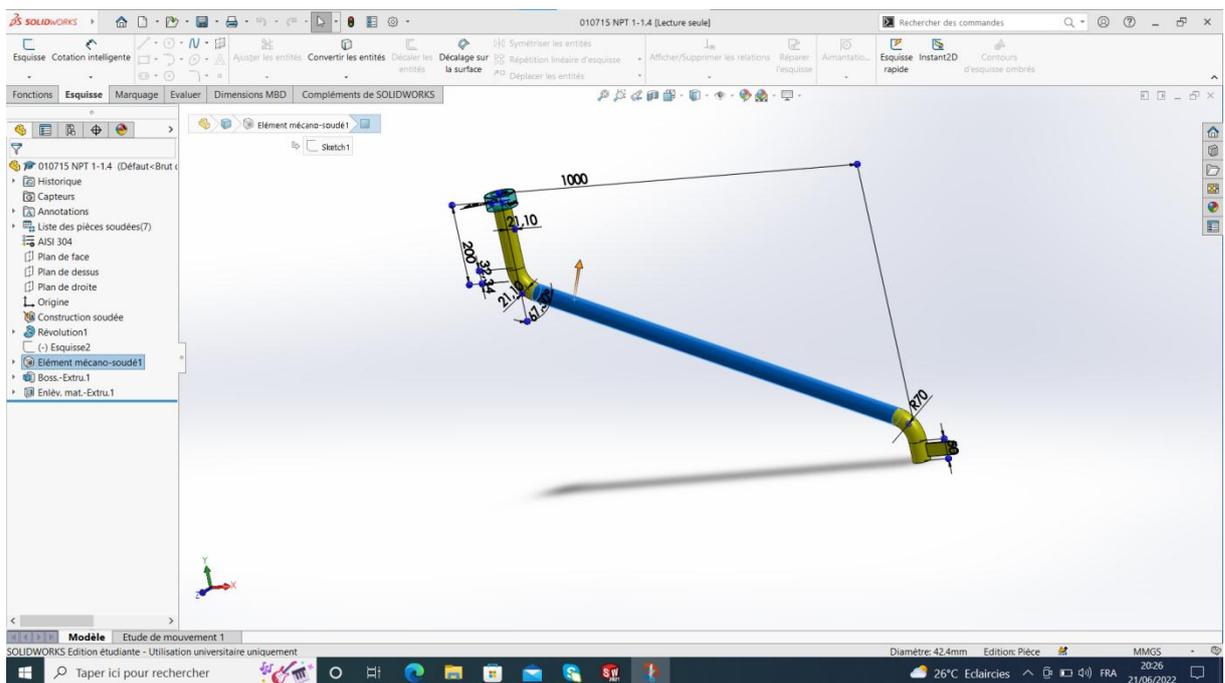


Figure III. 16: Interface graphique npt

III.3.13. Présentation de skid

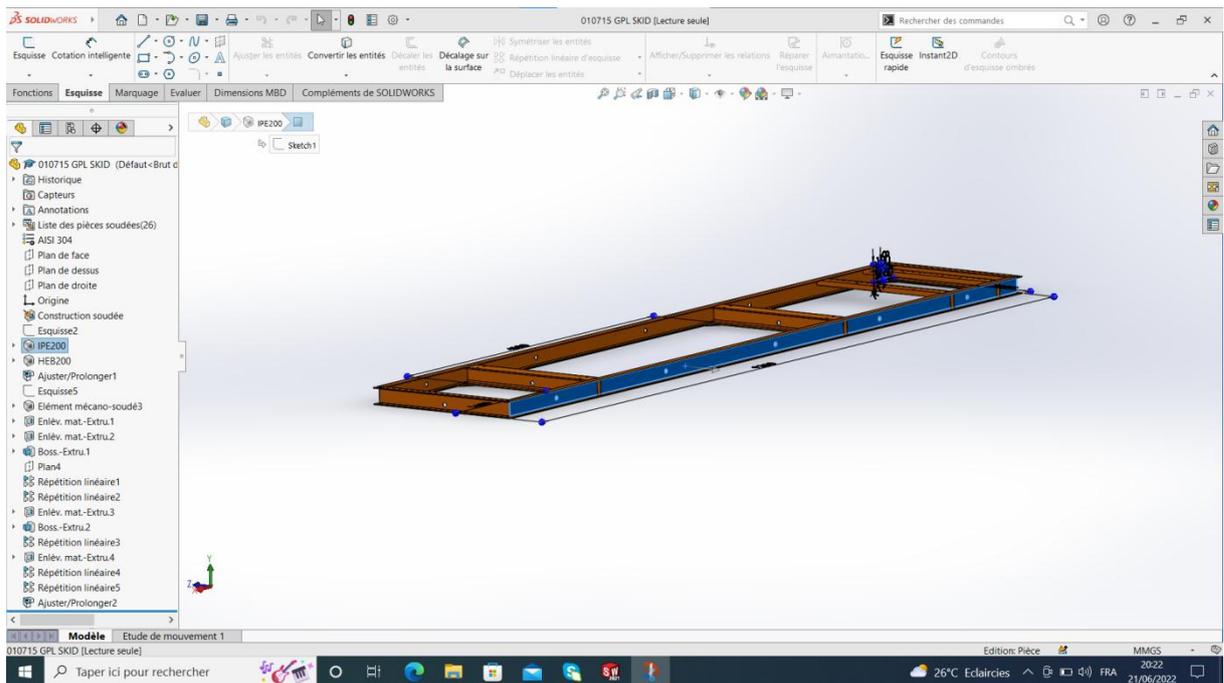


Figure III. 17: Interface graphique de skid sous SolidWorks.

III.3.14. Présentation welding neck flange

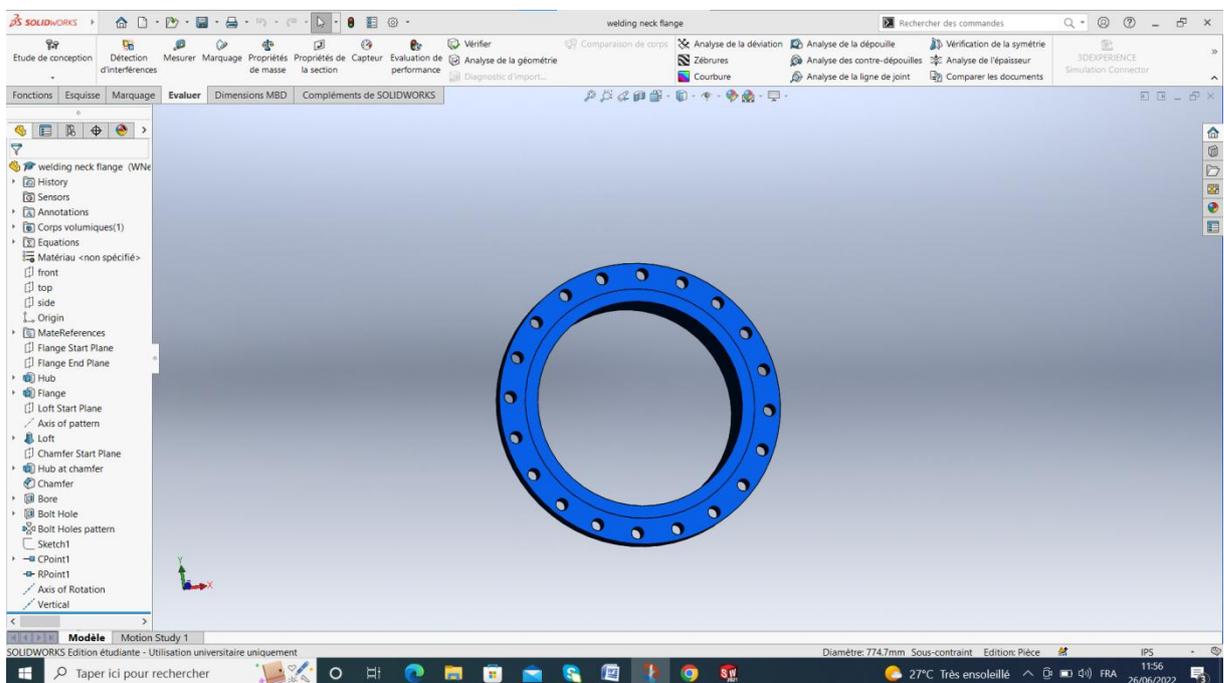


Figure III. 18: Interface graphique welding neck flange

III.4. Assemblage des composants

Les différentes étapes d'assemblage sont présentées comme suite :

Ouvrir l'interface d'assemblage du logiciel SolidWorks

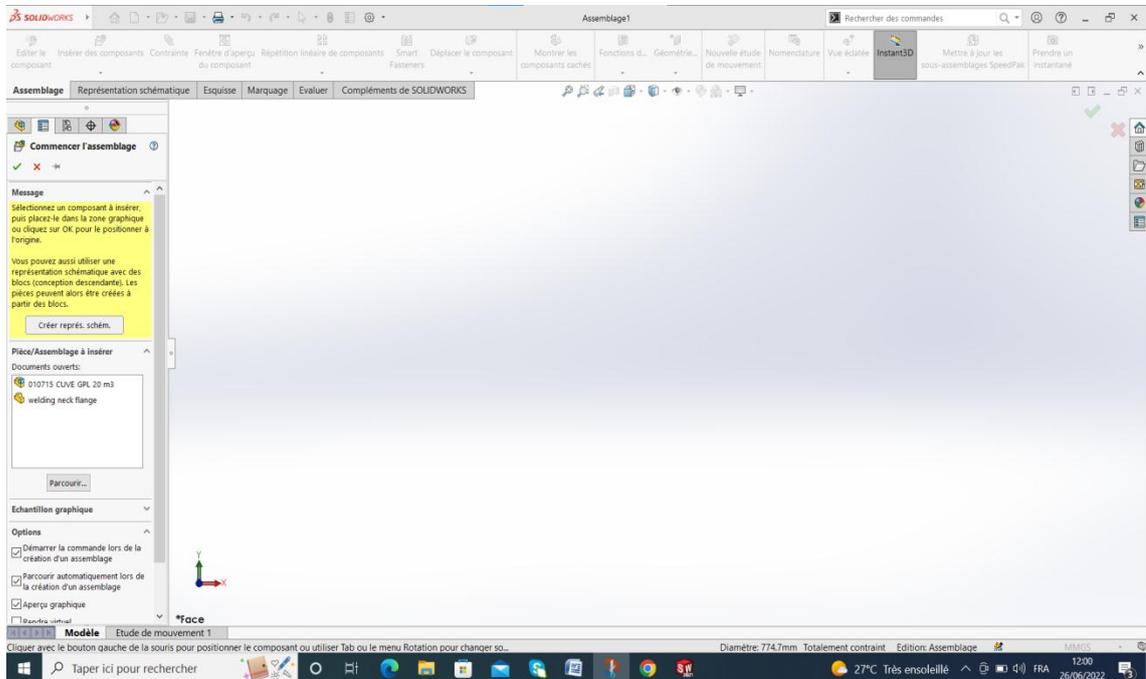


Figure III. 19: Interface d'assemblage.

Afin de parcourir les pièces, on clique sur BROWSE (ou parcourir), une fenêtre s'ouvre pour nous permettre de choisir les éléments nécessaires.

Ouvrir le dossier à assembler les différentes pièces :

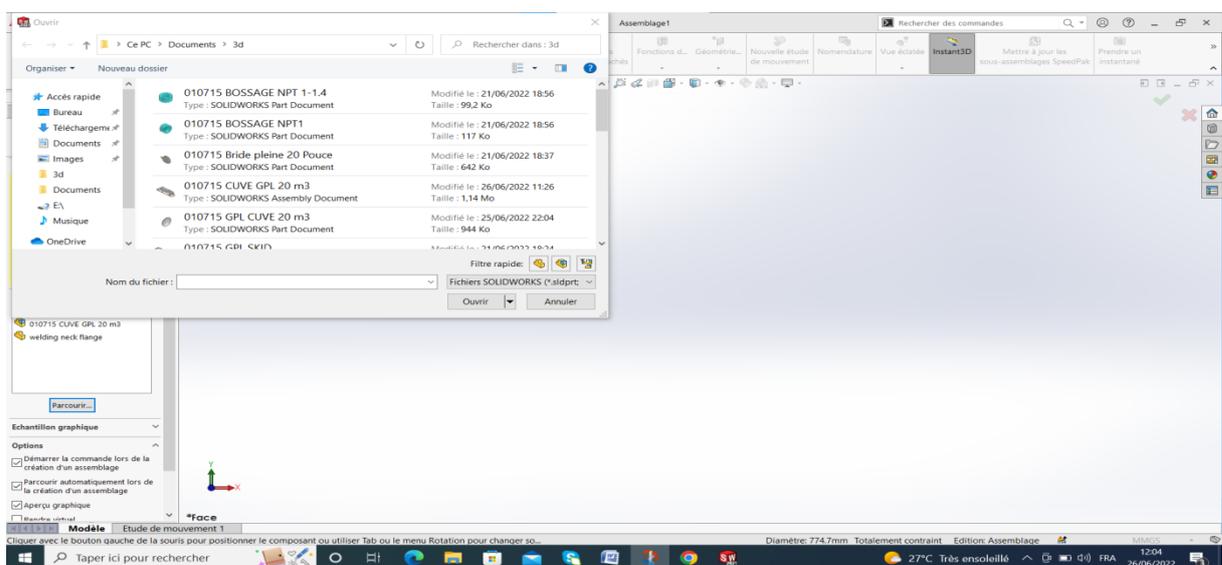
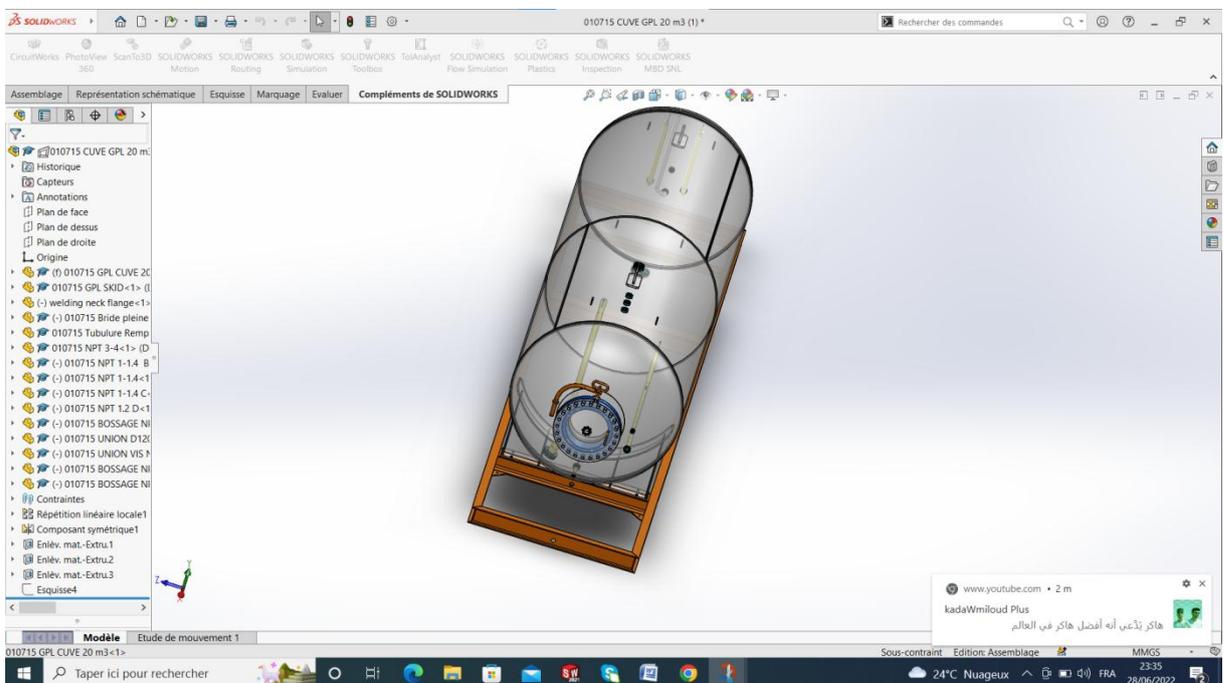
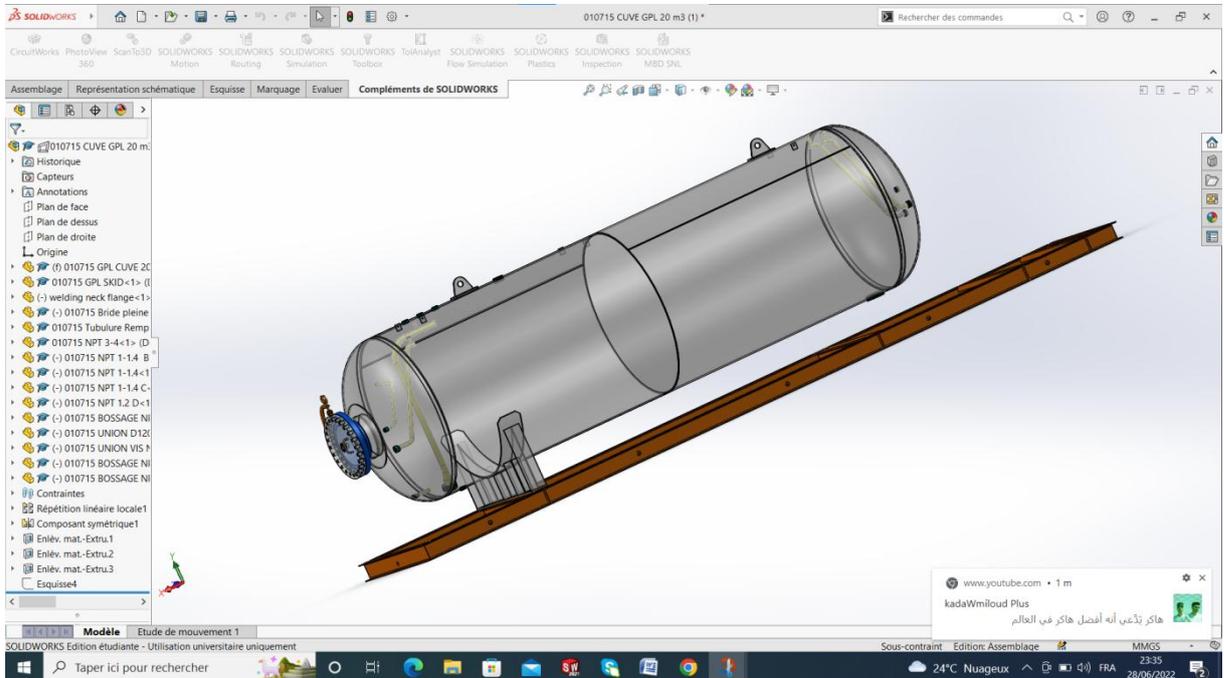


Figure III. 20: Parcourir le dossier des composants.

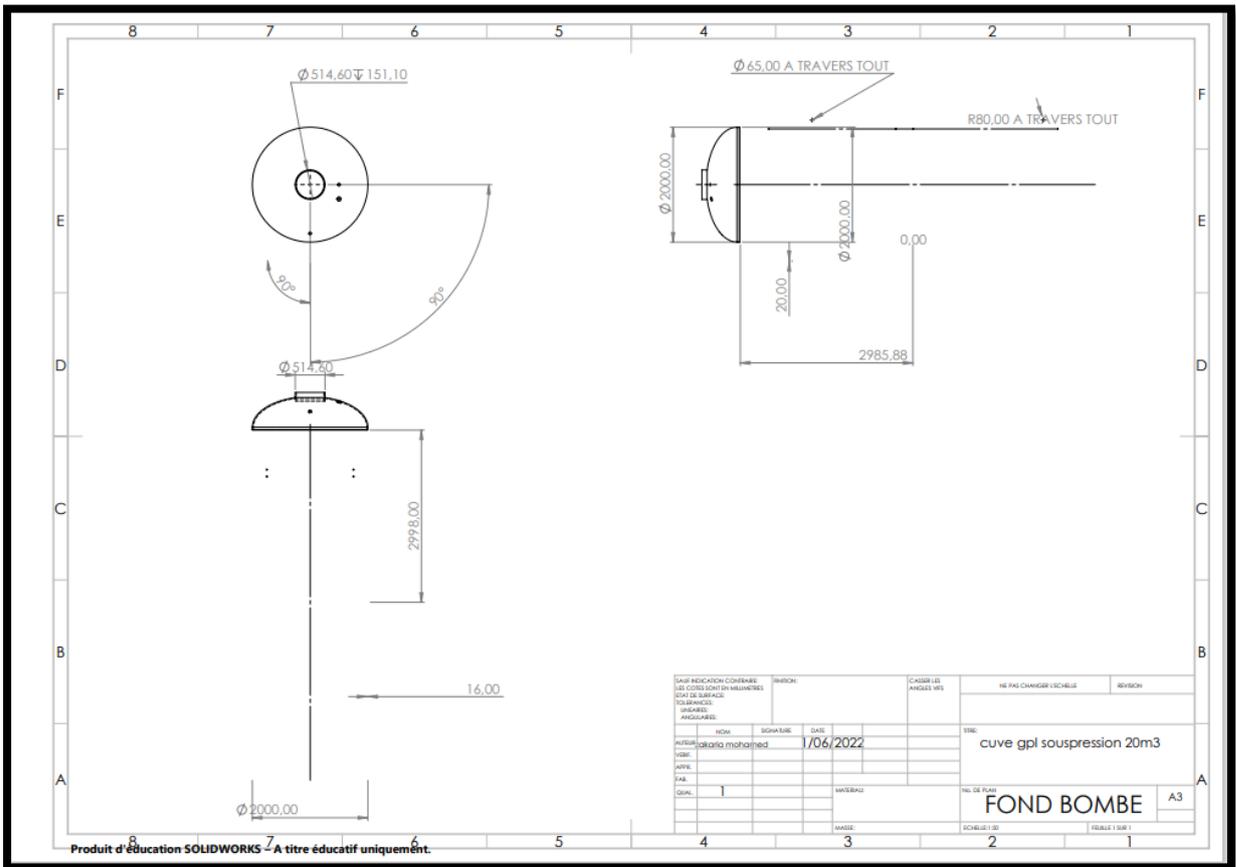
Chapitre III : Conception et simulation d'une cuve sous pression SolidWorks

SOLIDWORKS nous permet de choisir plusieurs pièces en même temps afin de faire leur assemblage.

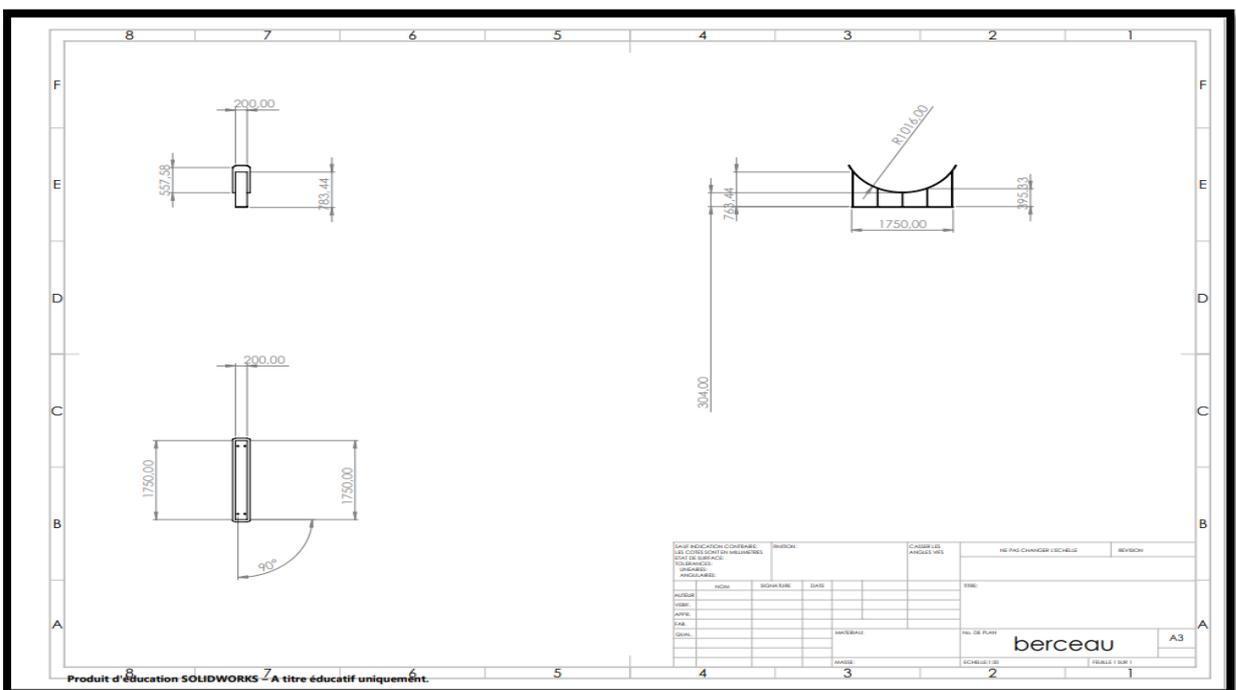
Parcourir et insérer tous les composants :



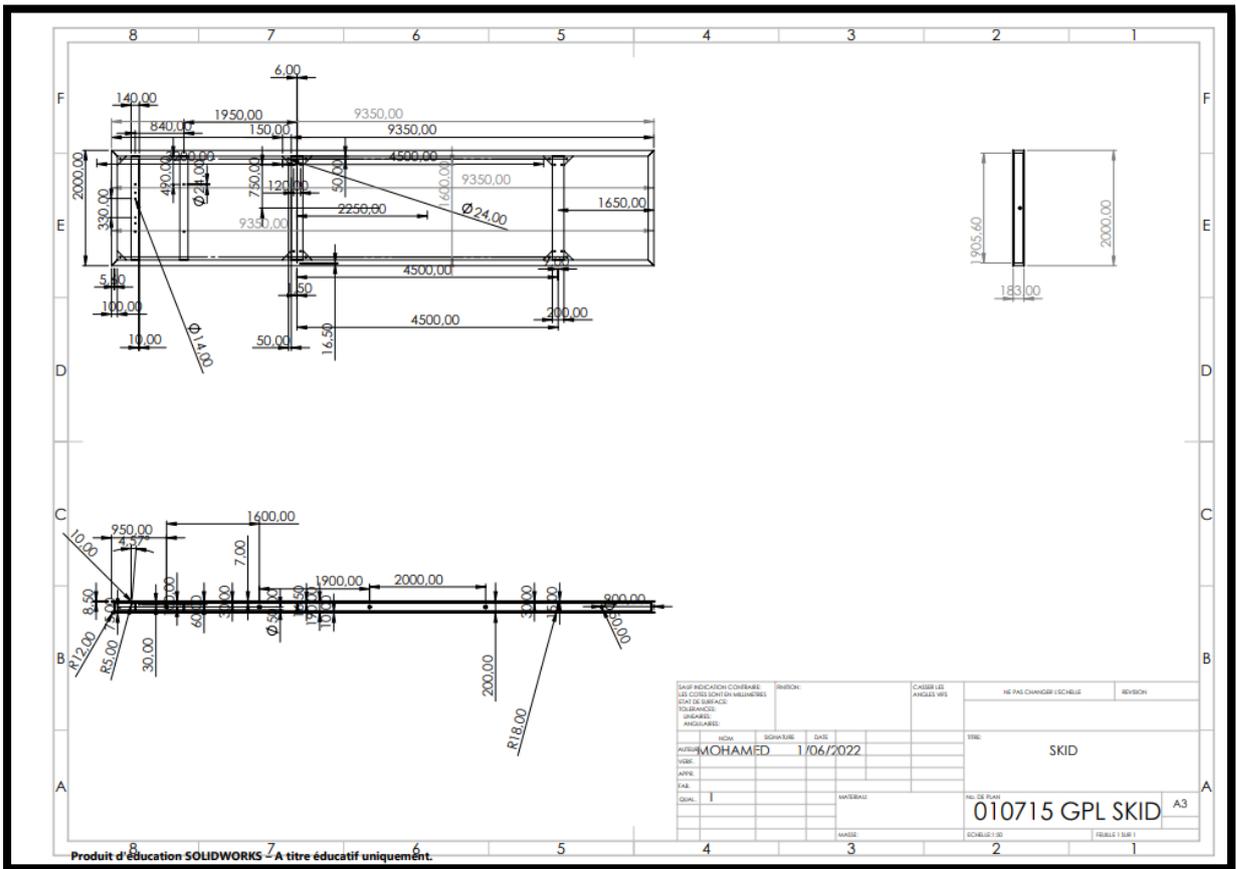
III.5.2. Mise en plan de fond elliptique



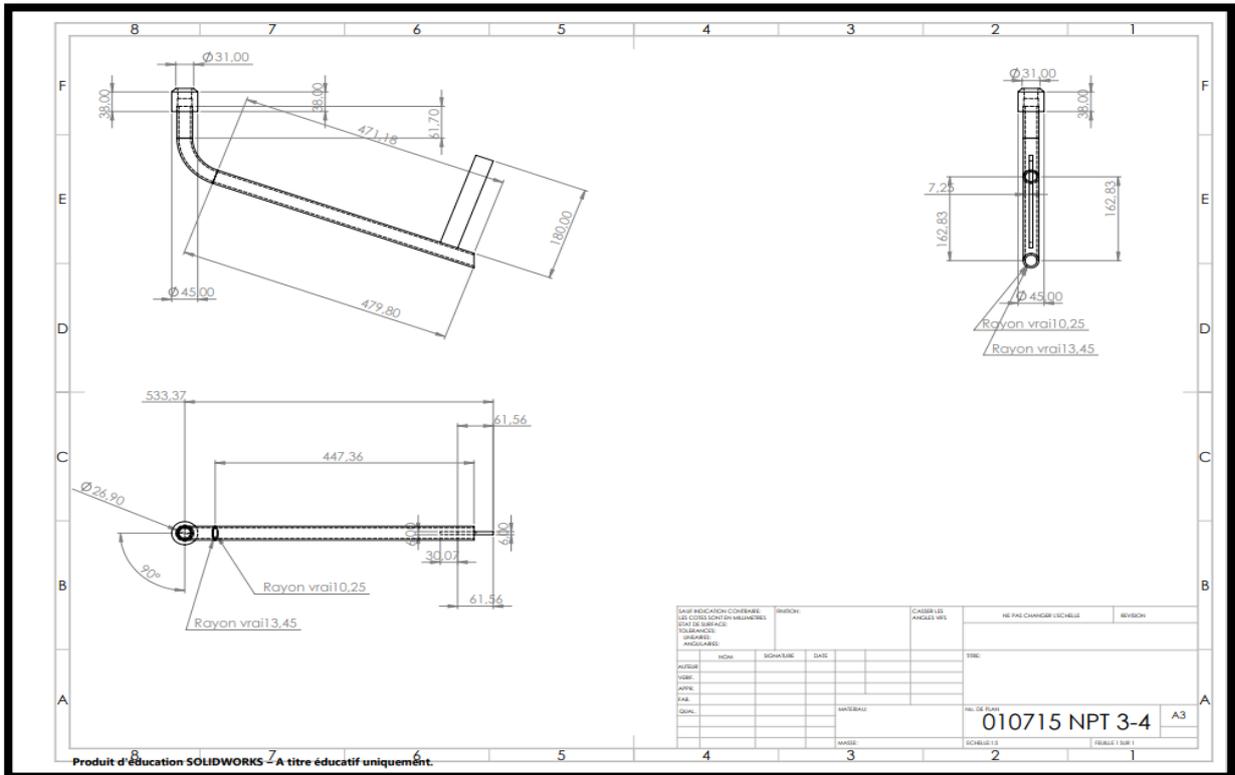
III.5.3. Mise en plan de berceau



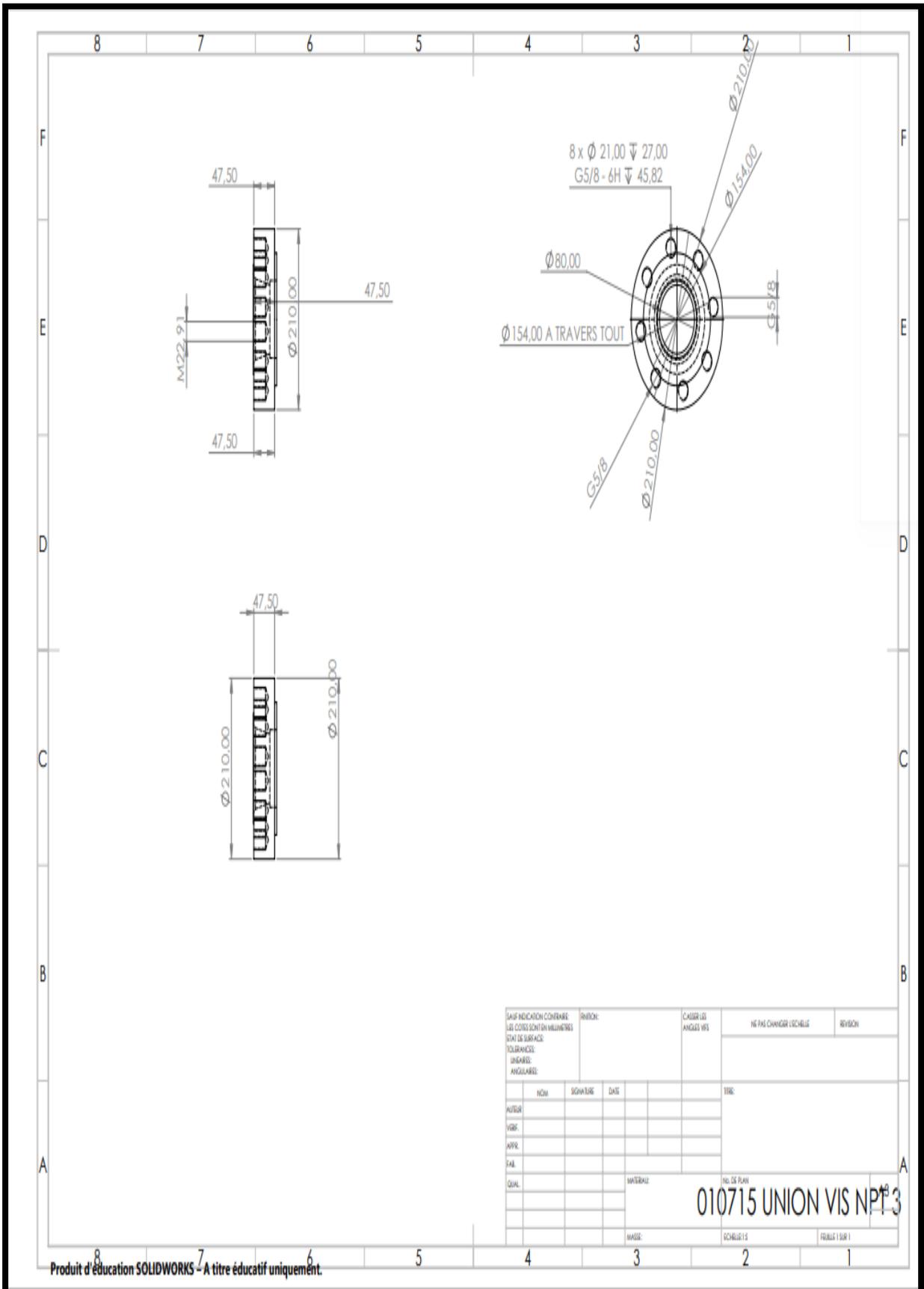
III.5.6. Mise en plan skid



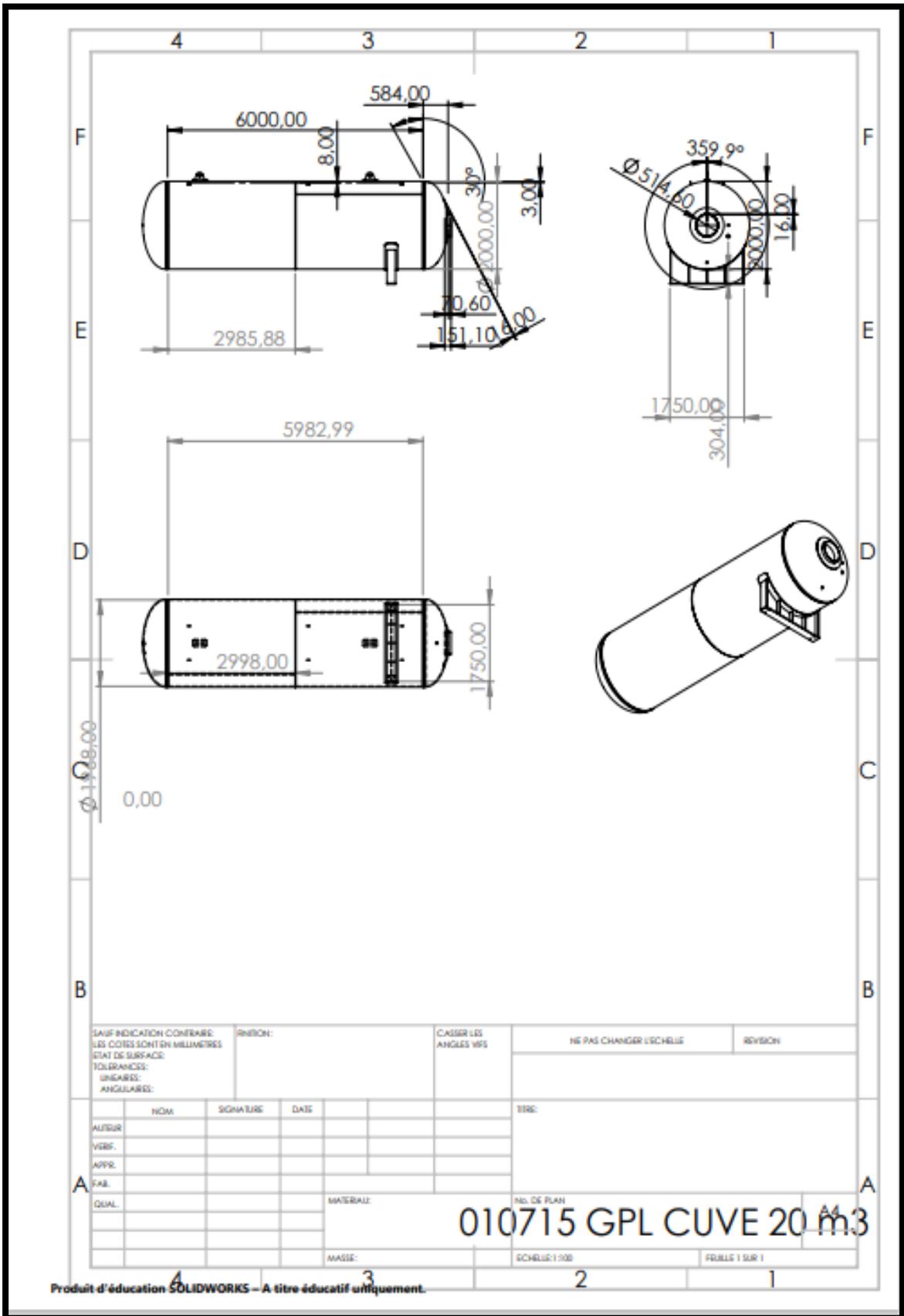
III.5.7. Mise en plan de npt



III.5.8. Mise en plan union vis



III.5.9. Mise en plan de la cuve



III.6. Simulation de la cuve sous pression

III.6.1. Introduction

Les solutions de simulation pour SOLIDWORKS, constituent un portefeuille facile à utiliser d'outils d'analyse, permettant de prédire le comportement physique réel d'un produit, entêtant virtuellement des modèles CAO.

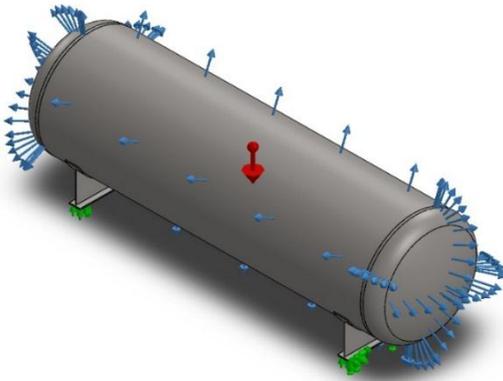
Les fonctionnalités exceptionnelles de SOLIDWORKS Simulation, répondent à toutes les préoccupations que peut avoir un concepteur ; la rapidité de mise en œuvre, la puissance et la précision de ces analyses vous permettant d'améliorer la qualité, la fiabilité et la performance de vos produits.

On peut ainsi en mesure de résoudre vos problématiques d'ingénierie, grâce à des scénarios de chargement complexes et de nombreux tests physiques, tout en bénéficiant d'un large éventail de paramètres : réponse linéaire, non linéaire statique et dynamique, comportement thermique, fatigue, mais également l'analyse de chargement dynamique et de matériaux.

SOLIDWORKS Simulation garantit la robustesse de notre produit, tout en limitant considérablement les coûts liés au prototypage et aux différents tests physiques.

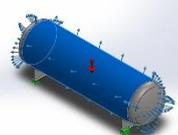
III.7. Assemblage de la cuve

III.7.1. Informations sur le modèle



Nom du modèle: SIMULATION CUVE 20m3 gpl
Configuration actuelle: Défaut

Corps volumiques		
Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques
Corps- Déplacer/Copier1[3]	Corps volumique	Masse:51.168 kg Volume:0.00656 m ³ Masse volumique:7800 kg/m ³ Poids:501.446 N
Symétrie4[2] 	Corps volumique	Masse:65.8679 kg Volume:0.0084446 m ³ Masse volumique:7800 kg/m ³ Poids:645.505 N
Révolution1 	Corps volumique	Masse:571.977 kg Volume:0.0733304 m ³ Masse volumique:7800 kg/m ³ Poids:5605.38 N
Corps- Déplacer/Copier1[2]	Corps volumique	Masse:65.8679 kg Volume:0.0084446 m ³ Masse volumique:7800 kg/m ³ Poids:645.505 N
Symétrie4[3] 	Corps volumique	Masse:51.168 kg Volume:0.00656 m ³ Masse volumique:7800 kg/m ³ Poids:501.446 N

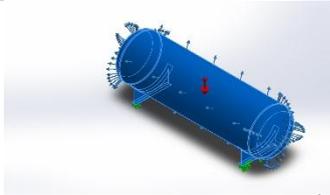
<p>Symétrie3</p> 	Corps volumique	<p>Masse:571.977 kg Volume:0.0733304 m³ Masse volumique:7800 kg/m³ Poids:5605.38 N</p>
<p>Révolution2</p> 	Corps volumique	<p>Masse:4667.21 kg Volume:0.59836 m³ Masse volumique:7800 kg/m³ Poids:45738.7 N</p>
<p>Corps- Déplacer/Copier1[1]</p>	Corps volumique	<p>Masse:47.6173 kg Volume:0.00610479 m³ Masse volumique:7800 kg/m³ Poids:466.65 N</p>
<p>Symétrie4[1]</p> 	Corps volumique	<p>Masse:47.6173 kg Volume:0.00610479 m³ Masse volumique:7800 kg/m³ Poids:466.65 N</p>

III.7.2. Propriétés de l'étude

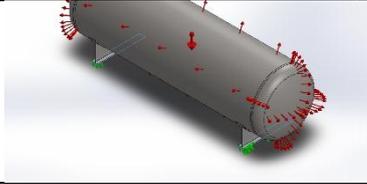
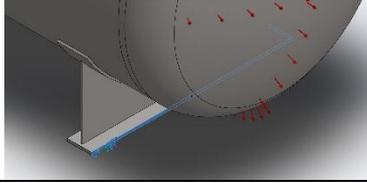
Nom d'étude	Analysestatique 1
Type d'analyse	Analysestatique
Type de maillage	Maillagevolumique
Effetthermiques:	Activé(e)
Option thermique	Inclure des chargementsthermiques
Température de déformationnulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SolidWorks Flow Simulation	Désactivé(e)
Type de solveur	FFEPlus
Stress Stiffening:	Désactivé(e)
Faibleraideur:	Désactivé(e)
Relaxation inertielle:	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Grand déplacement	Désactivé(e)
Vérifier les forces externes	Activé(e)
Friction	Désactivé(e)
Méthodeadaptative:	Désactivé(e)
Dossier de résultats	Document SolidWorks (C:\Users\khemmali .z \Desktop)

III.7.3. Unités

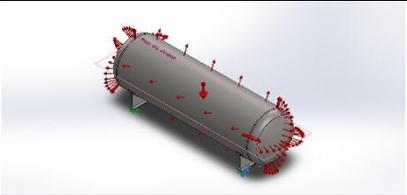
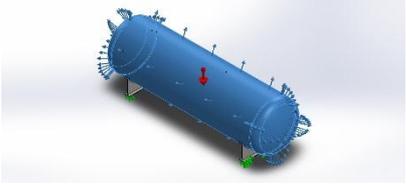
Système d'unités:	SI (MKS)
Longueur/Déplacement	mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	Rad/sec
Pression/Contrainte	N/m ²

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	<p>Nom: 1.0044 (S275JR)</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max.</p> <p>Limited élasticité: 2.75e+008 N/m²</p> <p>Limite de traction: 4.1e+008 N/m²</p> <p>Module d'élasticité: 2.1e+011 N/m²</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.28</p> <p>Masse volumique: 7800 kg/m³</p> <p>Module de cisaillement: 7.9e+010 N/m²</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: 1.1e-005 /Kelvin</p>	<p>Corps volumique 1(Corps-Déplacer/Copier1[3])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 2(Symétrie4[2])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 3(Révolution1)(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 4(Corps-Déplacer/Copier1[2])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 5(Symétrie4[3])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 6(Symétrie3)(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 7(Révolution2)(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 10(Corps-Déplacer/Copier1[1])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl),</p> <p>Corps volumique 11(Symétrie4[1])(SIMULATION CUVE 20m3 gpl)</p>

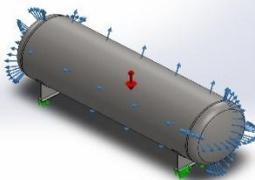
III.7.4. PROPRIÉTÉS DU MATÉRIAU

Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé		
Appui plan-1		Entités: 2 face(s) Type: Appui plan		
Forces resultants				
Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	-271.075	63734.9	-2.72357	63735.5
Moment de réaction(N.m)	0	0	0	0
Fixe-1		Entités: 2 face(s) Type: Géométrie fixe		
Forces résultantes				
Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	2.28027	1774.03	-4.26001	1774.04
Moment de réaction(N.m)	0	0	0	0

III.7.5. Actions extérieures

Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement	
Gravité1		Référence: Plan de dessus	Valeurs: 0 0 -9.81 Unités: SI
Pression-1		Entités: 7 face(s) Type: Normal à la face sélectionnée	Valeur: -2 Unités: N/mm^2 (MPa) Angle de phase: 0 Unités: deg

III.7.6. Informations sur le contact

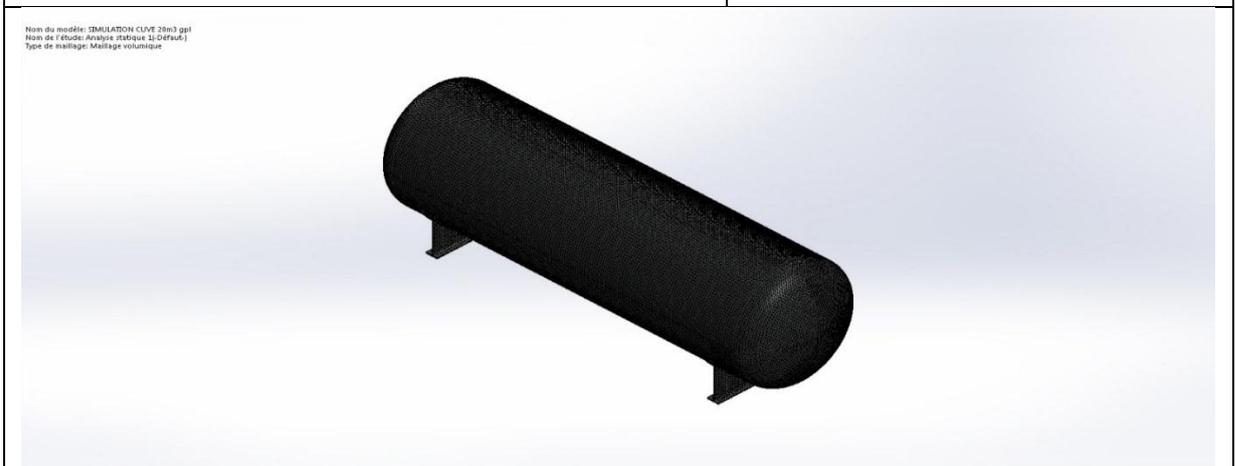
Contact	Image du contact	Propriétés du contact
Contact global		Type : Solidaire Composants : 1 composant(s) Options : Maillage compatible

III.7.7. Informations sur le maillage

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage standard
Transition automatique:	Désactivé(e)
Boucles automatiques de maillage:	Désactivé(e)
Points de Jacobien	4 Points
Taille d'élément	40.0146 mm
Tolérance	2.00073 mm
Qualité de maillage	Haute

III.7.8. Informations sur le maillage - Détails

Nombre total de noeuds	375193
Nombre total d'éléments	190328
Aspect ratio maximum	12.845
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	19.4
% d'éléments ayant un aspect ratio > 10	0.0231
% d'éléments distordus (Jacobien)	0
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:03:02
Nom de l'ordinateur:	PC-ZEKRAOUI



III.7.8. Forces résultantes

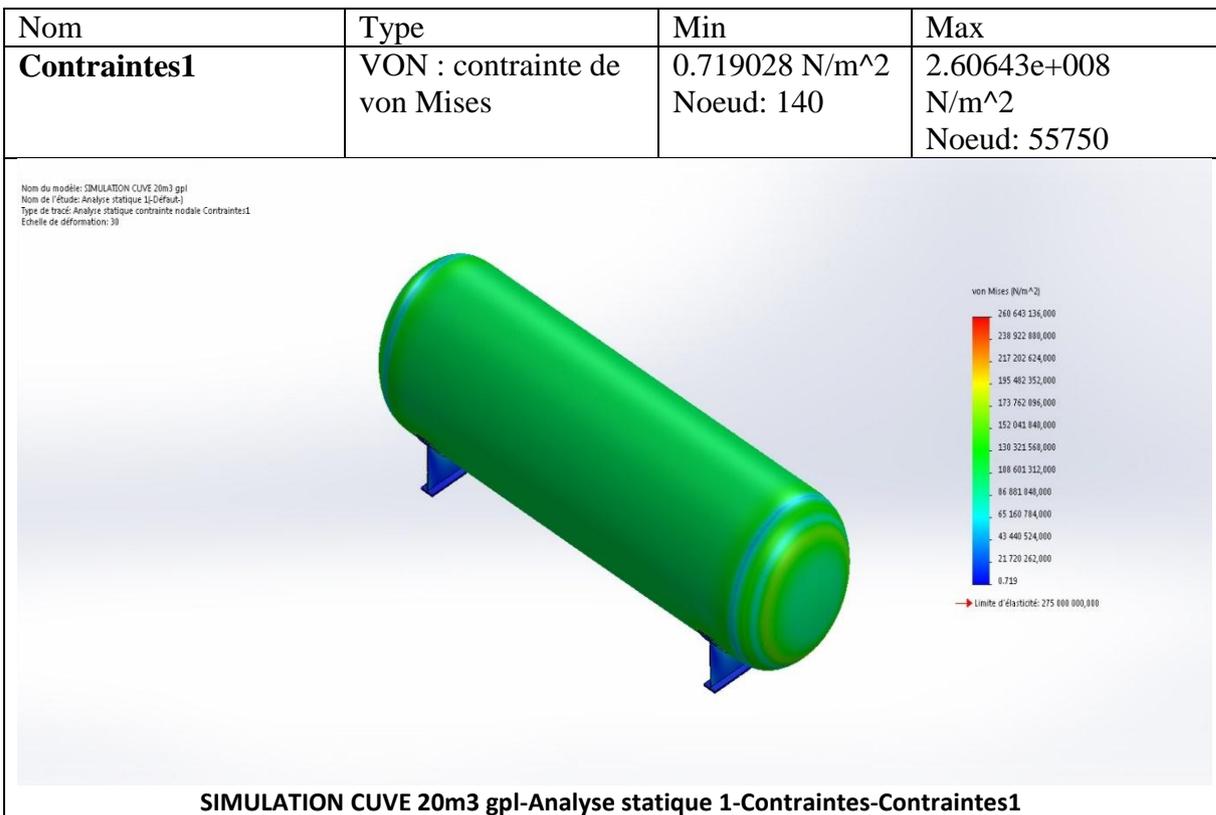
III.7.8.1. Forces de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	6.4816	60246.5	-26.0242	60246.5

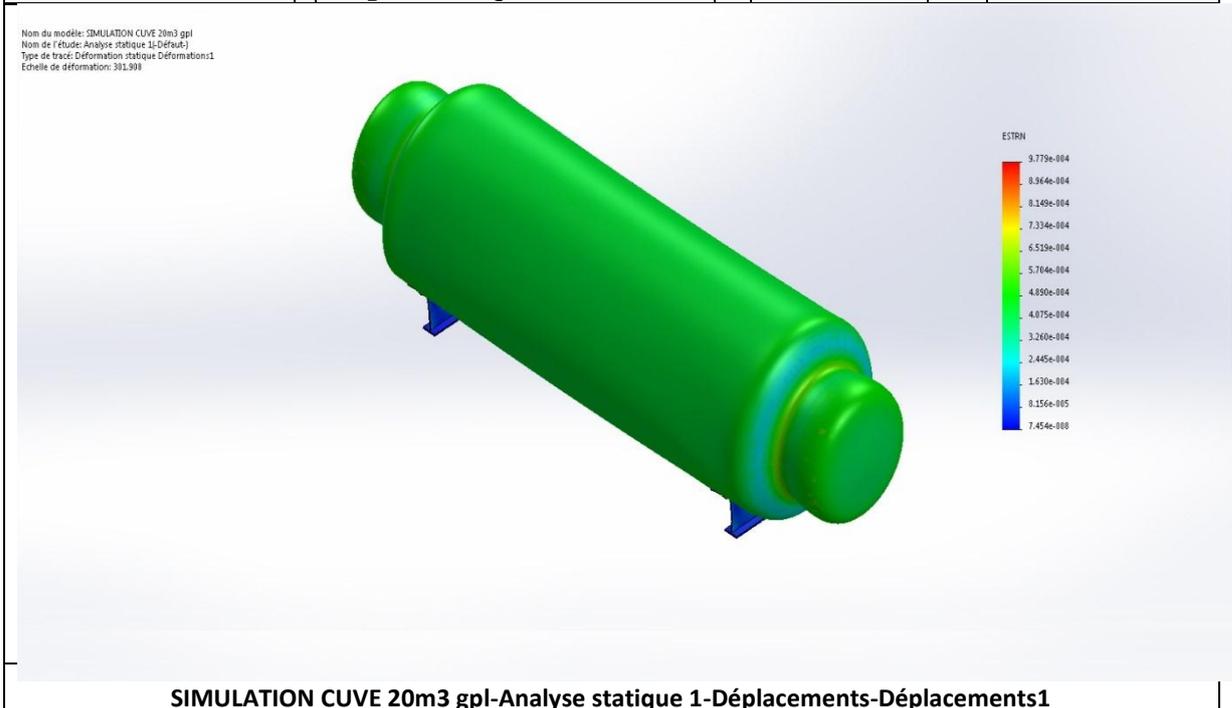
III.7.8.2. Moments de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	0	0	0	0

III.7.9. Résultats de l'étude



Nom	Type	Min	Max
Déformations1	STRESS:	7.4641e-008	0.002937548 mm
	Déplacement résultant	Elément 139	Elément 92856



III.8. Conclusion

La simulation avec SOLIDWORKS a permis de vérifier le matériau choisi et sa résistance, aussi de tester plusieurs coefficients de sécurité, de savoir plusieurs résultats sans faire des essais expérimentaux et aboutir à sa destruction, donc perte de matière, perte de temps ce qui influe sur le cout et le prix de reviens de la pièce intégrée. L'objectif de la simulation est de faire plusieurs tests sur différents matériaux afin de choisir le plus adéquat à une conception plus ou moins judicieuse et économique.

CHAPITRE IV :
Fabrication et soudage d'une
cuve sous pression

IV. CONCEPTION

IV.1. Les étapes de fabrication d'une virole

La fabrication d'une virole pour la réalisation d'une cuve suit un process particulier comportant plusieurs étapes :

- Découpe d'une tôle de virole à partir d'une tôle en acier inoxydable. Le développé de la virole est calculé en fibre neutre (c'est-à-dire à mi-épaisseur de virole). Le développé est donné par $\text{Diamètre} \times \pi$. Dans le cas où une virole possède des trous pour des piquages latéraux de cuves ou des ouvertures (portes, découpes...), ces découpes sont réalisées à plat au laser lors de la découpe de la tôle de virole.
- Raboutage éventuel. Si la virole doit être constituée en plusieurs panneaux, les panneaux sont soudés les uns aux autres suivant un procédé de soudage automatique (banc de soudure) à plat avant roulage.
- Roulage de la virole : la virole est passée dans une machine spéciale appelée rouleau (parce qu'elle est constituée de plusieurs rouleaux permettant le formage de la tôle). L'écartement des rouleaux détermine le rayon de cintrage de la tôle pour la virole. Toute la virole se trouve alors cintrée suivant le rayon correspondant exceptées pour les 2 extrémités des viroles qui ne peuvent être cintrées dès lors qu'a longueur est trop petite pour être en contact avec les 2 rouleaux inférieurs.
- Soudure de la virole : on parle de soudure de bouclage ou bien aussi de soudure longue. Cette opération est faite suivant le procédé automatique plasma tig au banc de soudage.
- Gabarisation de la virole après soudure : la matière se trouvant continue après soudure, il est alors possible de repasser la virole au rouleau pour reprendre le galbe des extrémités et donner une bonne rotondité à l'ensemble. La virole se trouve alors cylindrique.

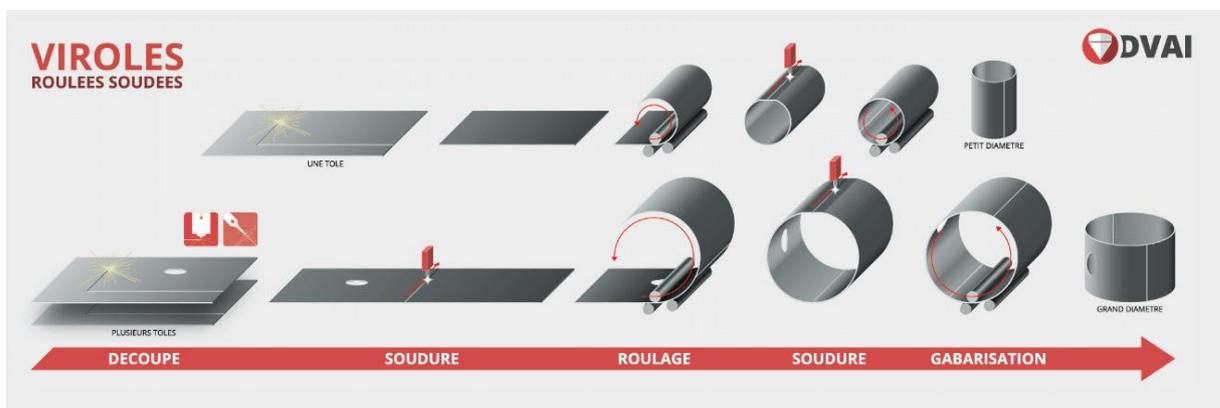


Figure IV. 1: Les étapes de fabrication d'une virole

IV.2. Les étapes de fabrication des fonds

Toutes les étapes de fabrication sont réalisées dans nos locaux depuis la découpe du disque initial jusqu'au polissage des fonds et la réalisation des ouvertures.

- Découpe des disques : chaque fond est fabriqué à partir d'un disque.
- Raboutage / soudage des disques si nécessaires : dans le cadre de fonds soudés, les parties du disque sont raboutées ensemble pour faire le flanc qui sera formé.
- Contrôles destructifs ou non destructifs : la fabrication de fonds entrant dans la composition d'une cuve suivant la DESP ou respectant un code de construction (CODAP 2015 par exemple) nécessite la réalisation de contrôles sur la soudure (radio, coupon témoin, ressuage). Un fond sans soudure ne nécessite pas de contrôle, c'est pour cela que DVAI dispose de tôles inox de grande largeur pour la réalisation de fond de grand diamètre sans soudure.
- Formage : les étapes de formage dépendent de la gamme de fabrication du fond.
- Décapage : pour vous fournir un fond prêt à l'utilisation, tous les fonds que fabrique sont dégraissés, décapés et passivés.
- Polissage : propose le polissage automatique des fonds en intérieur ou en extérieur suivant vos exigences ; exigences esthétiques (respect d'un grain de polissage) ou exigences de rugosité (Ra maximum).
- Découpe des ouvertures pour les piquages : pour vous faciliter le montage des tubes sur les fonds, réalise les ouvertures en commande numérique dans ses ateliers au jet d'eau ou au laser pour un maximum de précision.

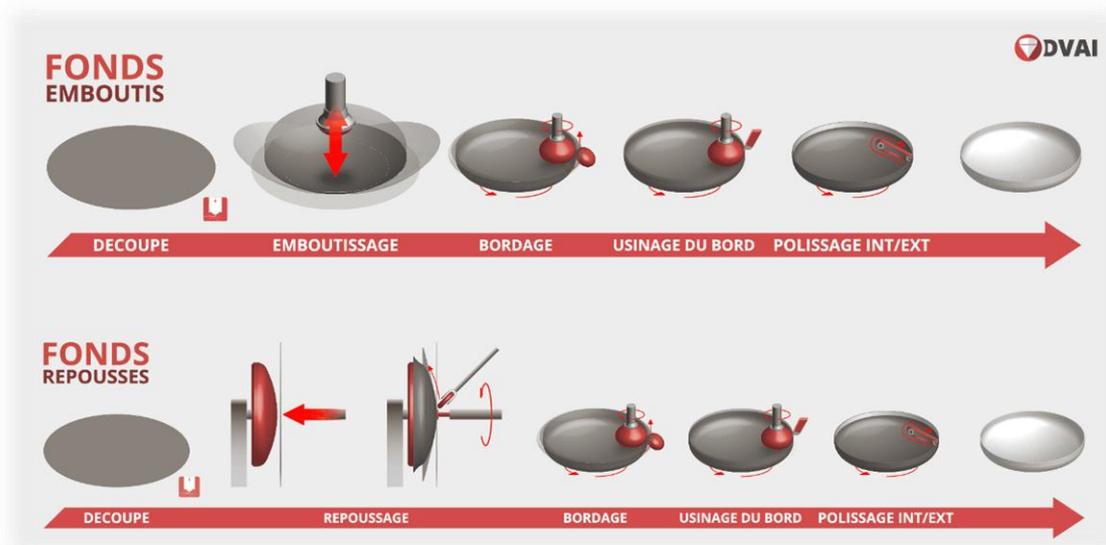


Figure IV. 2: Les étapes de fabrication des fonds

IV.3. Fond bombé à souder pour cuve

Les désignations d'un fond bombé sont nombreuses : fond de cuve, fond à souder, fond bombé, fond embouti, caps, fond de tube... et elles peuvent varier en fonction de leur application. On considère plusieurs grandes familles de fonds : les calottes sphériques, les fonds bombés, les fonds plats, les fonds coniques et les fonds hémisphériques.

IV.3.1. Fonds bombés

Un fond bombé dit en anse de panier (fond torisphérique) est constitué d'une calotte sphérique en partie centrale, d'un élément torique appelé carre et d'un bord droit cylindrique permettant le raccordement avec le corps de cuve.

Les fonds bombés sont définis par plusieurs éléments :

- Le diamètre extérieur ou intérieur
- Le rayon de la partie de la calotte (Rayon de bombage) : R_{bomb} ou R_i
- Le rayon de carre : R_c
- L'épaisseur départ de la tôle ou épaisseur finie du fond : E ou e
- Le bord droit : B_d défini par sa valeur et le type d'usinage à réaliser.

IV.3.2. FOND GRC : fond à grand rayon de carre

Les caractéristiques du fond GRC suivant la norme NFE 81-102 sont les suivantes :

- Rayon d'emboutissage égal au diamètre du fond
- Rayon de carre égal à 10% du diamètre du fond

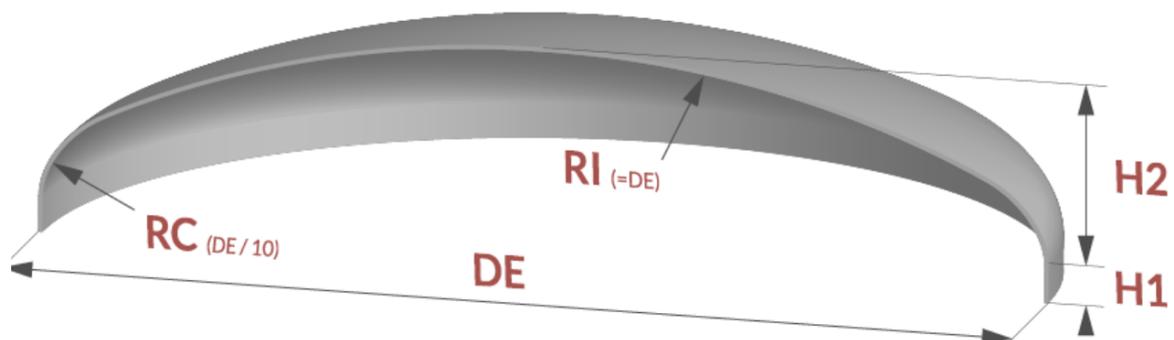


Figure IV. 3: FOND GRC

IV.3.3. FOND PRC : fond à petit rayon de carre

Les caractéristiques du fond GRC suivant la norme NFE 81-101 sont les suivantes :

- le Rayon d'emboutissage est toujours supérieur à la valeur du diamètre du fond
- le rayon de carre ne peut prendre que 3 valeurs en fonction du diamètre du fond :

* $rc = 30$ pour un diamètre $< 800\text{mm}$

* $rc = 40$ pour un diamètre entre 800mm et 1000mm

* $rc = 50$ pour $1000\text{mm} < \text{diamètre}$

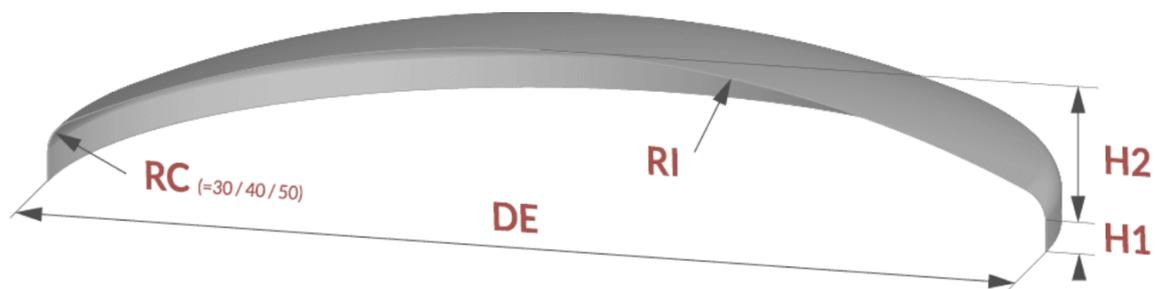


Figure IV. 4; FOND PRC

IV.3.4. FOND ELL : fond elliptique

Suivant la NFE 81-103, les caractéristiques du fond elliptique sont les suivantes :

- rayon d'emboutissage = $0.8 \times$ diamètre du fond
- rayon de carre = $0.154 \times$ diamètre du fond

Avec ceci, le fond elliptique est plus profond que le fond GRC.

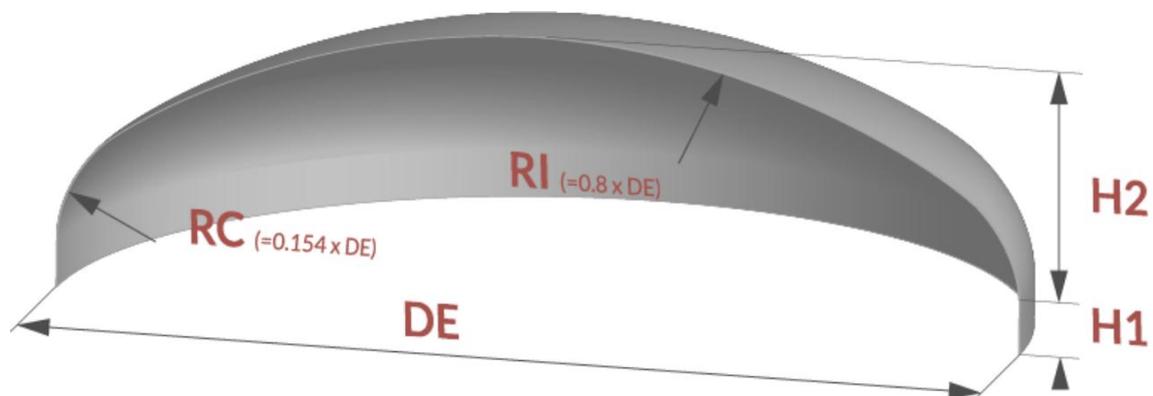


Figure IV. 5: Fond elliptique

IV.3.5. Fond plat

Un fond plat est un disque dont le bord est tombé suivant un rayon. Il n'y a aucun rayon de bombage dans la partie centrale. Les fonds plats peuvent être utilisés par exemple dans le domaine de l'agroalimentaire pour faire des tables tournantes ou des plateaux de distribution.

La hauteur intérieure du fond plat est déterminée par la valeur du rayon de carre ajoutée à la valeur du bord droit du fond.

Comme les calottes sphériques, les fonds plats ne sont pas normés.

IV.3.6. Fond conique

Un fond conique est composé d'un cône dont le bord du grand diamètre est tombé comme pour un fond plat.

Les composantes déterminantes d'un fond conique sont les suivantes :

- grand diamètre
- petit diamètre
- rayon de carre
- bord droit
- hauteur totale ou angle de base ou (demi-)angle au sommet : avec les éléments précédents, un élément parmi ces 3 seulement permet de déterminer complètement la géométrie du cône.

IV.3.7. Calotte sphérique

La calotte sphérique est un disque formé sur toute leur surface suivant un rayon donné. Elle forme donc une portion de sphère. Une calotte sphérique est complètement définie par son diamètre, son rayon intérieur de formage (aussi appelé rayon de bombage). Une calotte ne possède pas de bord tombé.

Plus le rayon d'emboutissage de la calotte est petit, plus la calotte sera profonde et difficile à fabriquer.

Les calottes ne sont pas normées.

IV.4. Généralités sur le soudage

Histoire du soudage

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est intervenue à la fin du XIX^e siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance (figure 1.1) et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la Première Guerre mondiale.

IV.4.1. Définition

C'est un procédé d'assemblage permanent de 2 ou plusieurs pièces par fusion localisée du métal.

IV.4.2. Principe

« Soudage : opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties assemblées, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. »

IV.4.3. Différence entre soudage et brasure

- Les différentes techniques de soudage
- Le soudage au chalumeau
- Le soudage TIG
- Le soudage MMA
- Le soudage MIG-MAG
- Le soudage plasma

IV.4.3.1. Le soudage au chalumeau

Le soudage au chalumeau, ou soudage flamme, est l'une des techniques de soudage les plus connues et les plus employées. Son principe est simple : il faut obtenir une flamme à l'aide du chalumeau et de deux types de gaz. Il faut un gaz carburant (comme l'acétylène, le propane, le butane ou le méthane) et un gaz comburant (principalement l'oxygène mais parfois l'hydrogène ou le gaz naturel).

La flamme est le plus souvent obtenue par un mélange d'oxygène et d'acétylène (nommé oxy-acétylène) ou par un mélange d'oxygène et de propane (nommé oxy-propane) parce que ces mélanges donnent de très hautes températures favorables à la fusion des métaux.

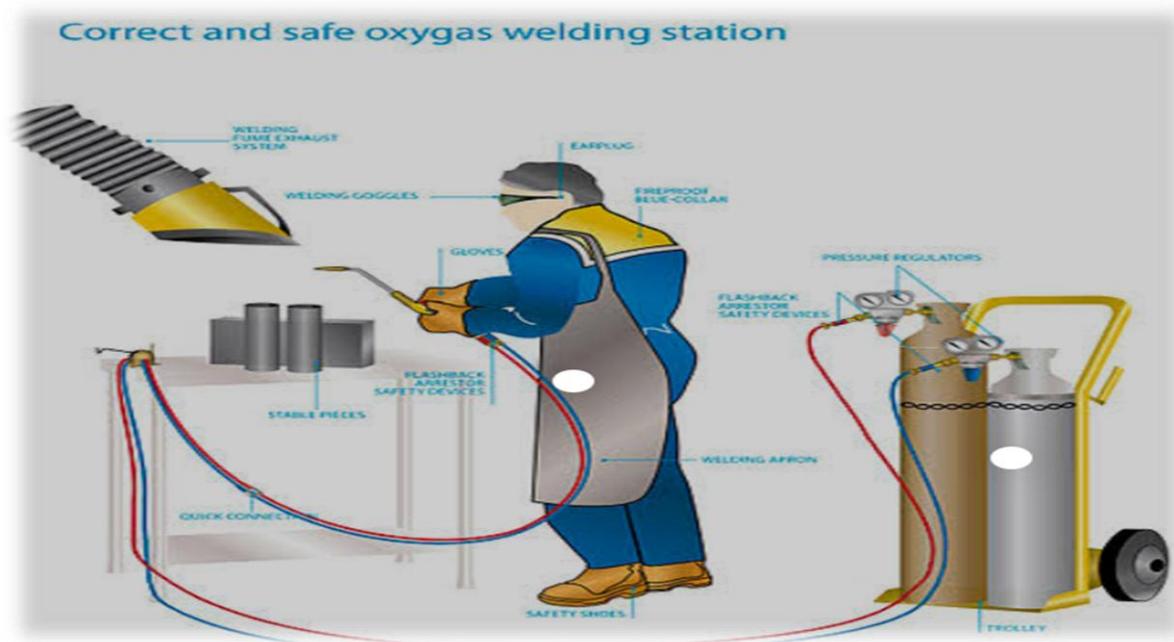


Figure IV. 6: Soudage au chalumeau

IV.4.3.2. Le soudage TIG

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) est une technique de soudure utilisant un arc électrique, une électrode en tungstène et un gaz inerte (ou neutre). L'arc électrique est établi entre une électrode en tungstène et les pièces à souder. Un gaz neutre est projeté dans la zone de soudage pour protéger l'arc électrique, l'électrode, le métal d'apport et le bain de fusion de l'oxydation de l'air. Ce gaz neutre est généralement de l'argon car il peut protéger tous les métaux en fusion. Ce type de soudage est destiné à la réalisation de travaux fins requérant une qualité de soudure parfaite

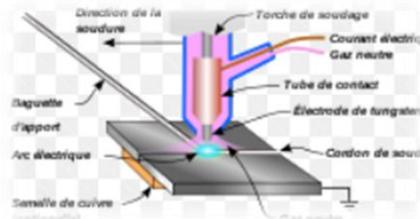


Figure IV. 7: Soudage TIG

IV.4.3.3. Le soudage MMA

Le soudage MMA (Manual Metal Arc) est une technique de soudure à l'arc électrique. Le but est de créer un court-circuit qui provoque un arc électrique et un très grand dégagement de chaleur (4000 voire 4500°C). C'est l'électrode qui sert de métal d'apport et qui permet donc de réaliser la soudure en fondant sur la pièce à souder. L'électrode peut être de trois types différents :

Elle peut être rutile c'est-à-dire que l'enrobage est en oxyde de titane, en alliage ferreux et en silicate ;

Elle peut être basique avec un enrobage en carbonate de calcium, en alliage et en fondant (spathfluor) permettant d'abaisser la température de fusion ;

Elle peut être cellulosique avec un enrobage de cellulose et de matières organiques qui assure une abondance de gaz et permet une meilleure pénétration.

L'électrode détermine le choix de la polarité : une électrode rutile a une polarité directe (électrode au -) tandis qu'une électrode basique a une polarité inversée (électrode au +).

Le soudage MMA est employé pour les soudures épaisses, les cordons larges et les gros efforts mécaniques.

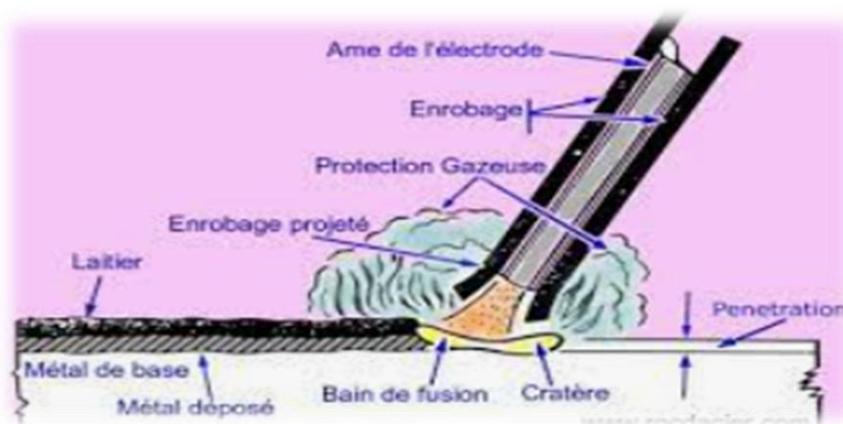


Figure IV. 8: Soudage MMA

IV.4.3.4. Le soudage MIG-MAG

Le soudage MIG-MAG est une technique de soudure qui crée un arc électrique et qui mélange deux procédés : le procédé MIG (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection inerte et le procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz de protection actif. Avec cette technique, l'électrode sert de métal d'apport. Le gaz inerte (Argon ou Hélium) dans le procédé MIG et le gaz actif (Argon/CO₂ ou Argon/Oxygène) dans le procédé MAG permettent de protéger l'électrode, l'arc électrique et le bain de fusion. Cette technique de soudage est utilisée pour les soudures par points, épaisses ou rapides pour les matières suivantes : acier, inox, aluminium.

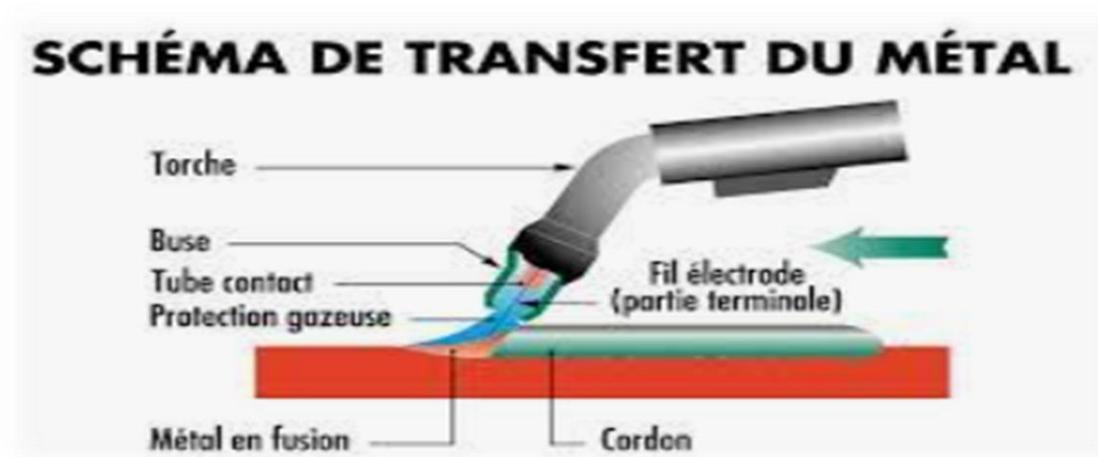


Figure IV. 9: Soudage MIG –MAG.

IV.4.4. Soudage plasma

Considéré comme une évolution du soudage TIG, destiné pour le soudage bord à bord des tôles et des tubes dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 8mm (procédé 15 selon l'ISO 4063). Un arc est créé entre une électrode de tungstène et la pièce à souder, à la manière du procédé TIG, un gaz plasmagène est injecté dans une chambre refroidie et permet de forcer l'arc à passer au travers d'une tuyère (également refroidie), et augmente ainsi la puissance de l'arc qui devient très localisé. Un gaz additionnel protège le bain de fusion des influences atmosphériques. Le procédé plasma requiert un gaz plasmagène et un gaz de protection. Le plasma permet d'atteindre une température de 15 000 °C et il est très fortement accéléré par le passage dans la tuyère. Le terme plasma est utilisé lorsque l'arc n'est plus composé d'atomes et de molécules, mais d'ions et d'électrons.

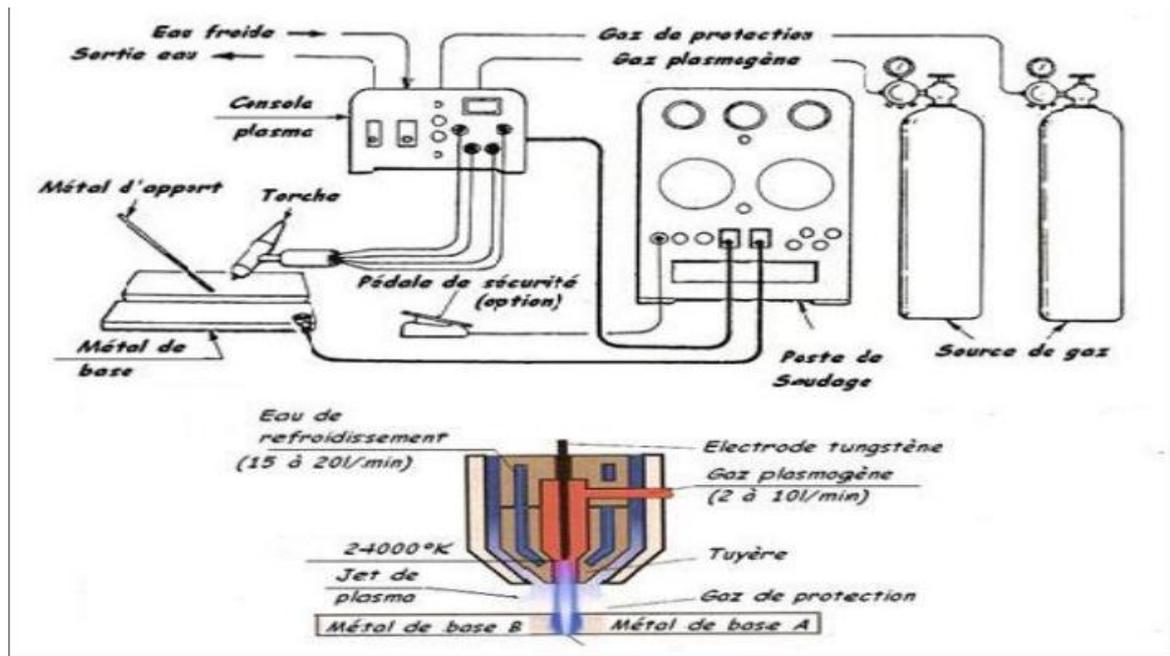


Figure IV. 10: Soudage Plazma

IV.5 Principaux métaux pour soudage

Aciers : Les aciers à faible teneur en carbone ($C < 0,25$ Va) se soudent sans précaution particulière. Les difficultés de soudage augmentent avec la masse des pièces ou avec la teneur en carbone.

Aluminium E7 alliages légers : On évite de souder les alliages à traitement thermique (fragilité du métal au voisinage de la soudure). On soude principalement les métaux suivants : ✓ Al 99,5 — AlMg 5 — Al Mg 4; ✓ cuivre et alliages cuivreux .

IV.6. Différents types de joints de soudure

Les joints de soudure sont un bord ou un point où deux ou plusieurs pièces métalliques ou pièces en plastique sont jointes ensemble. Les deux ou plusieurs pièces (en métal ou en plastique) sont assemblées à l'aide d'un procédé de soudage approprié pour former un joint solide. Selon l'American Welding Society, il existe fondamentalement cinq types de joints de soudure et ce sont le joint bout à bout, le joint d'angle, le joint à recouvrement, le joint en T et le joint de bord.

Les 5 joints de soudure de base sont

1. Butt joint
2. Corner joint

3. Lap joint
4. Tee joint et
5. Joint de bord

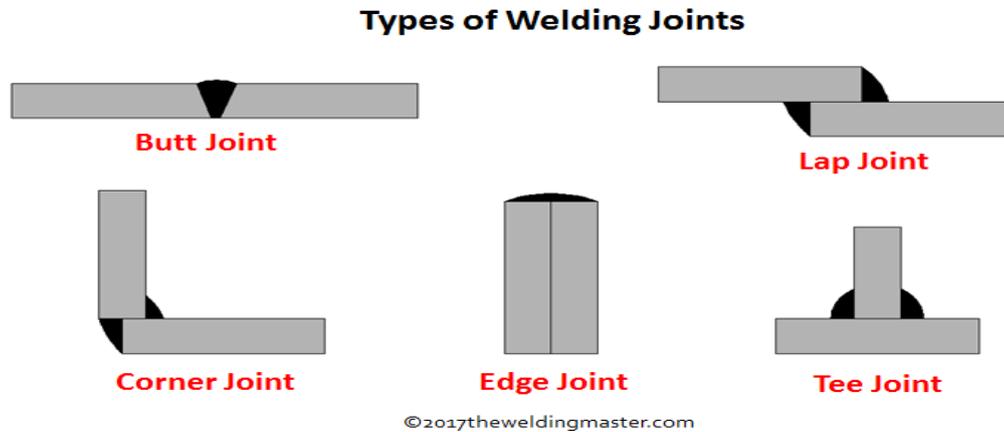


Figure IV. 11: Technologie des différents types de soudage selon les normes ISO.

IV.7. Les défauts de soudage

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Sont exposés dans cette ressource les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Ce sont :

- Les fissures,
- Les soufflures,
- La pollution ferreuse,
- Les inclusions,
- Les retassures et criques de solidification.

IV.7.1. Les fissures

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

Dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.

Dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure :

La fissuration à chaud,

La fissuration à froid.

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore).



Figure IV. 12: Exemples de fissures

IV.7.2. Les soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres

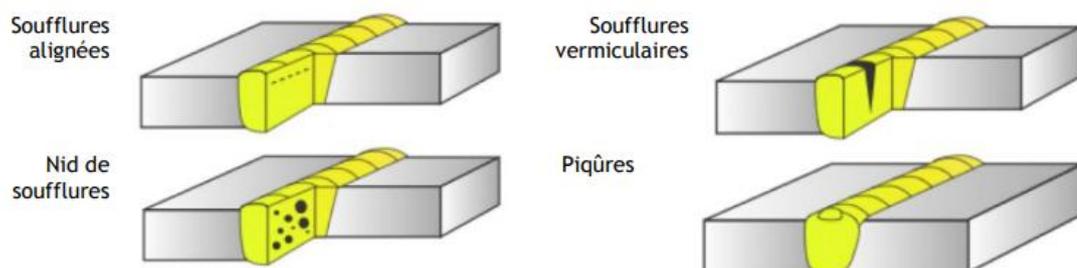


Figure IV. 13: Les différents types de soufflure

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour les prévenir, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures.

Enfin, les piqures sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base

IV.8. Défauts de soufflures ou cavités

Les soufflures (cavités) sont des défauts fréquents en soudage. Ce sont souvent des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure. Les piqures sont des soufflures débouchantes, donc visibles en surface.

IV.8.1. Types de soufflures fréquentes

- Nid de soufflures
- Soufflures vermiculaires
- Piqures

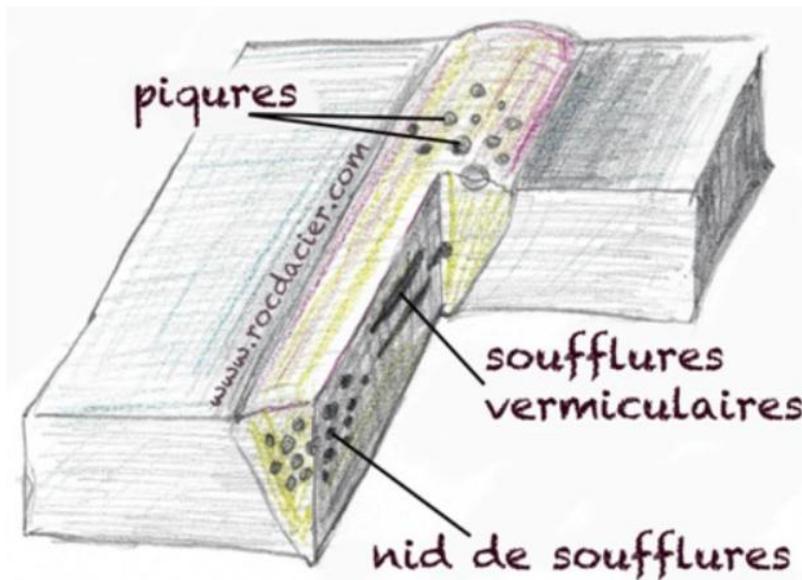


Figure IV. 14: Soufflures et cavités

IV.8.2. Causes des soufflures

- Les soufflures peuvent être dues :
 - ➔ à des courants d'air
 - ➔ un manque de gaz de protection
 - ➔ un débit de ce gaz trop faible
 - ➔ la présence de graisse ou d'huile sur le métal de base ou le métal d'apport,

- ➔ une buse encrassée
- ➔ un mauvais angle de soudage qui entraîne une mauvaise protection gazeuse
- ➔ des impuretés dans le joint à souder.

IV.8.3. Remèdes contre le défaut de soufflures

Pour limiter le risque de soufflures :

- ➔ S'assurer que la surface du métal de base et d'apport sont propres et non gras.
- ➔ vérifier la protection gazeuse
- ➔ Une intensité de courant trop faible et une vitesse de soudage trop élevée peut entraîner ce défaut
- ➔ les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

IV.9. Défauts de fissures

Les fissures sont des ruptures du matériau. Elles sont orientées selon le type de défaut. Ces fissures peuvent se trouver aussi bien dans le métal de base que dans le cordon de soudure, dans la zone affectée thermiquement ou la zone de liaison.

IV.9.1. Types de fissures fréquentes

- ➔ Fissure longitudinale
- ➔ Fissure transversale
- ➔ Fissure de cratère
- ➔ Fissure sous cordon débouchante
- ➔ Fissure sous cordon non débouchante

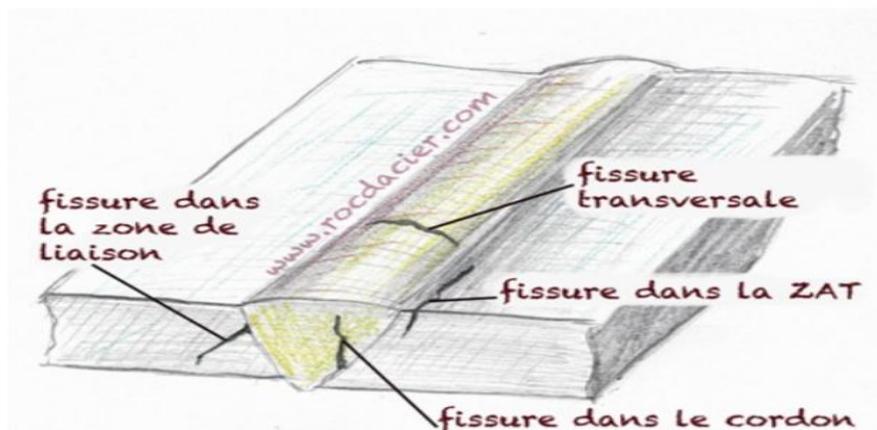


Figure IV. 15: Les fissures

IV.9.2. Causes des fissures

Les fissures peuvent être dues :

- ➔ à des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...)
- ➔ volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite...)
- ➔ arrêt trop brutal de la soudure
- ➔ arrêt prématuré de la protection gazeuse en TIG.

IV.9.3. Remèdes contre les fissures

Pour éviter les fissures :

- ➔ Choisir un métal d'apport approprié
- ➔ Adopter un préchauffage approprié
- ➔ Effectuer une bonne préparation des joints

IV.9.4. La fissuration à chaud

Types d'inclusions fréquentes :

- ➔ Inclusion solide : corps étranger inclus dans le cordon de soudure.
- ➔ Inclusion de laitier : morceau de laitier inclus dans le cordon de soudure.
- ➔ Inclusion de flux : morceau de flux inclus dans le cordon de soudure.
- ➔ Inclusion d'oxyde : oxyde métallique emprisonné dans la soudure.
- ➔ Inclusion métallique : particule métallique de composition différente au cordon emprisonnée

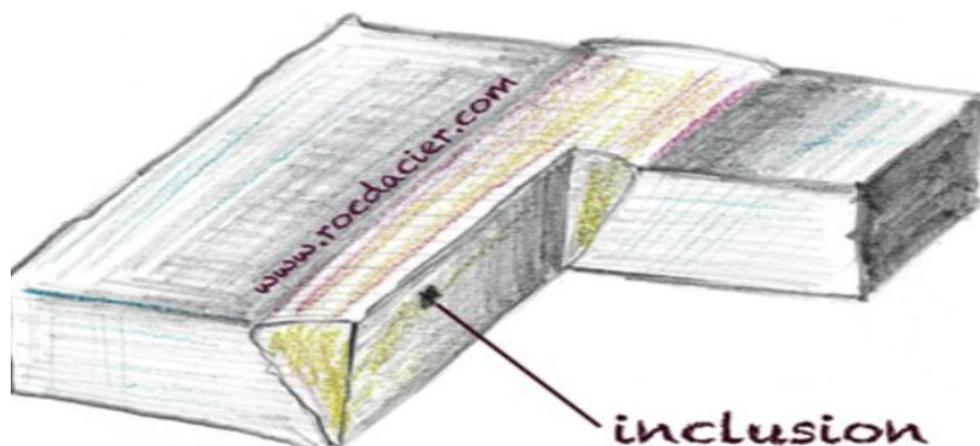


Figure IV. 16: Inclusions

IV.10. Défaut de manque de fusion (collage)

Concernant le manque de fusion, il s'agit d'une mauvaise continuité métallurgique entre les métaux à assembler. Il peut aussi s'agir de manque de fusion des passes les unes avec les autres.

IV.10.1. Types de manque de fusion

- ➔ Manque de fusion des bords à souder
- ➔ Manque de fusion entre les passes.
- ➔ Manque de fusion à la racine.

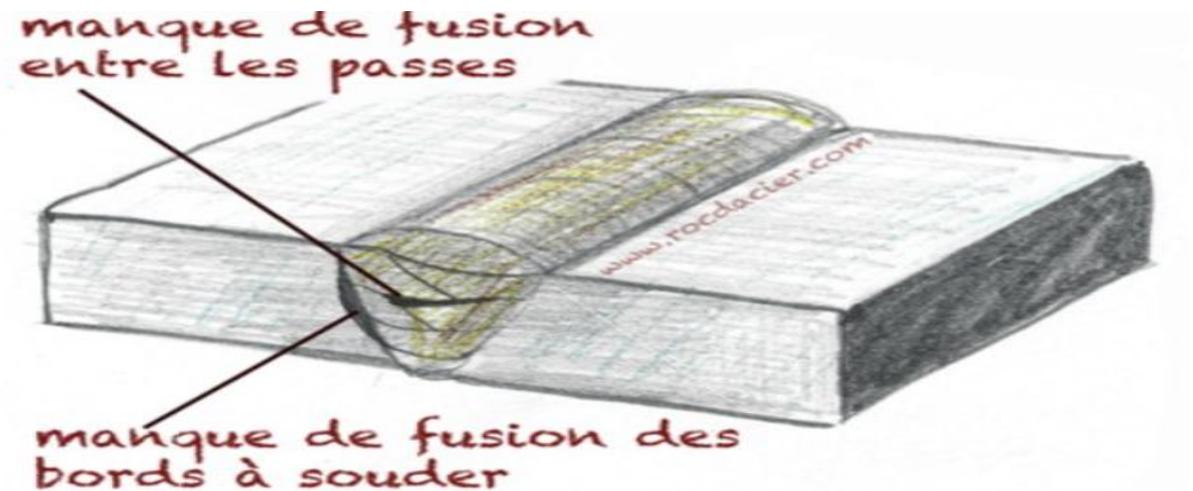


Figure IV. 17: Manque de fusion

IV.10.2. Causes des défauts de collage

Ces défauts sont fréquents en soudage MAG et surviennent généralement quand :

- ➔ Angle du chanfrein trop étroit
- ➔ Mauvaise orientation des électrodes
- ➔ Intensité trop faible

Remèdes :

- ➔ Mettre en œuvre un DMOS adapté

IV.11. Défaut de pénétration

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration. L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente.

Causes des défauts d'excès de pénétration :

- ➔ Jeu de soudage trop grand
- ➔ Vitesse d'avance trop lente
- ➔ Intensité trop élevée
- ➔ Distance électrode/pièce trop courte

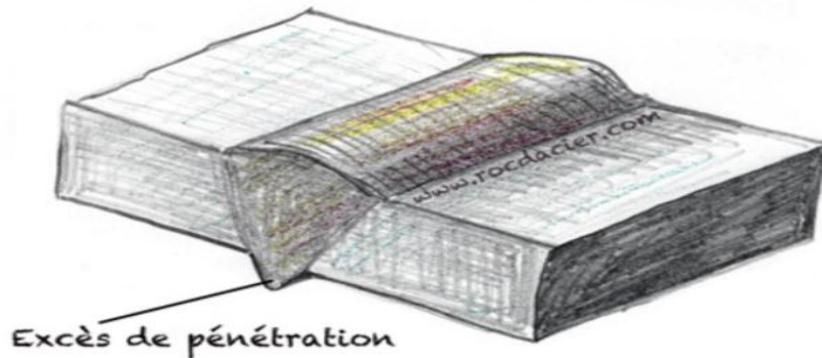


Figure IV. 18: Excès de pénétration

Remèdes :

- ➔ Réduire le jeu de soudage
- ➔ Souder plus vite
- ➔ Réduire l'intensité
- ➔ Rapprocher la torche de la pièce pendant le soudage

Causes des défauts de manque de pénétration

- ➔ Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées)
- ➔ Vitesse d'avance trop élevée
- ➔ Intensité trop faible
- ➔ Métal de base trop froid

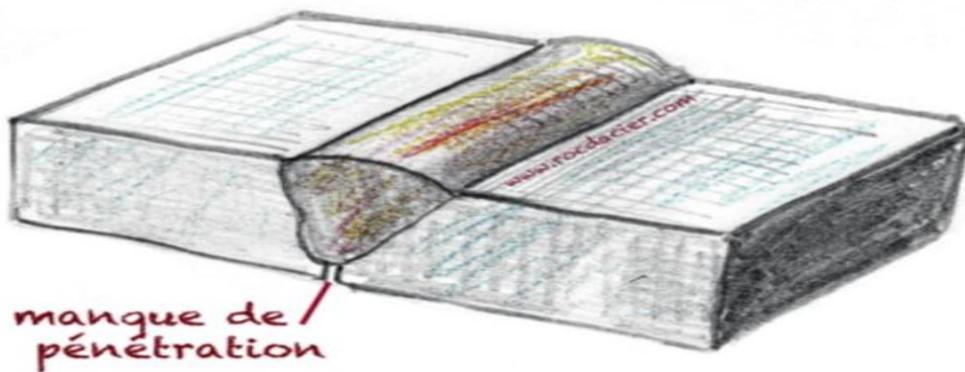


Figure IV. 19: Manque de pénétration

Remèdes :

- ➔ Agrandir l'écart des pièces à souder
- ➔ Souder plus doucement
- ➔ Augmenter l'intensité
- ➔ Préchauffer les pièces

IV.12. Défaut d'effondrement

Lorsque l'énergie de soudage est trop importante, on peut avoir un effondrement du métal pendant la fusion.

IV.12.1. Types d'effondrements

- ➔ Effondrement à plat
- ➔ Effondrement en angle
- ➔ Effondrement en corniche

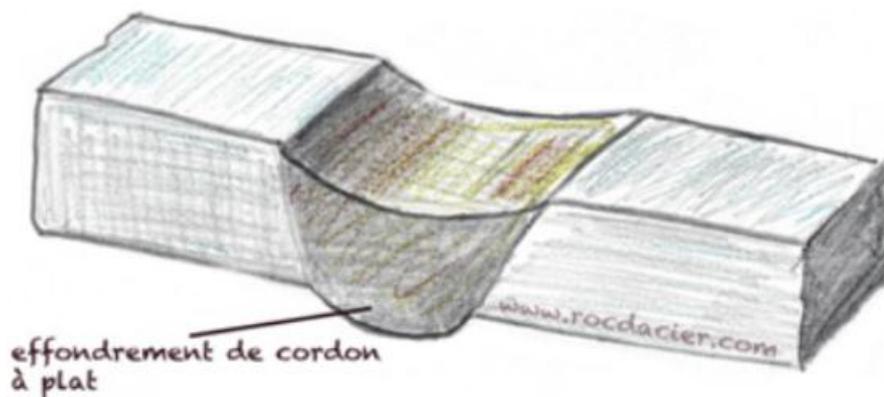


Figure IV. 20: Effondrement du cordon

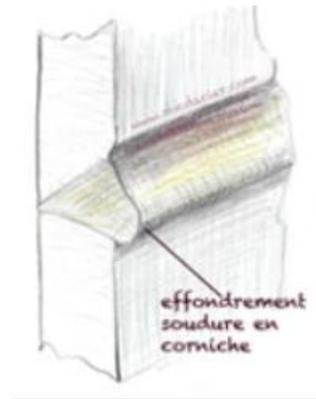


Figure IV. 21: Effondrement en corniche

IV.13. Défauts retassures et criques

Lorsque le métal se refroidit, il est possible que le cordon ne se referme pas de façon uniforme en fin de soudure. Le creux formé est appelé retassure. Les retassures de cratère sont des défauts dus à une mauvaise reprise de passes ou à un arrêt trop brusque de l'arc électrique. Les criques sont défauts non visibles.

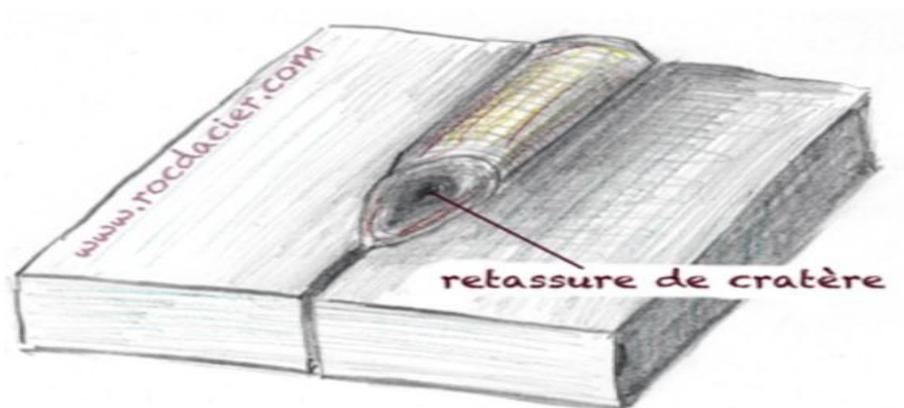


Figure IV. 22: Retassure de cratère

IV.14. Morsures et caniveaux

Le caniveau est un défaut dû à une trop grande énergie apportée pendant la soudure. Ce qui entraîne un creux sur une grande partie de la longueur de la soudure. Les caniveaux peuvent être en surface, entre le cordon et le métal de base (y compris entre les passes, si plusieurs passes). Ils peuvent aussi être à la racine.

Les morsures sont des défauts locaux (ponctuels).

On veillera à réduire l'énergie de soudage pour éviter ce défaut (réduire intensité, augmenter la vitesse d'avance, augmenter la longueur d'arc, ...)

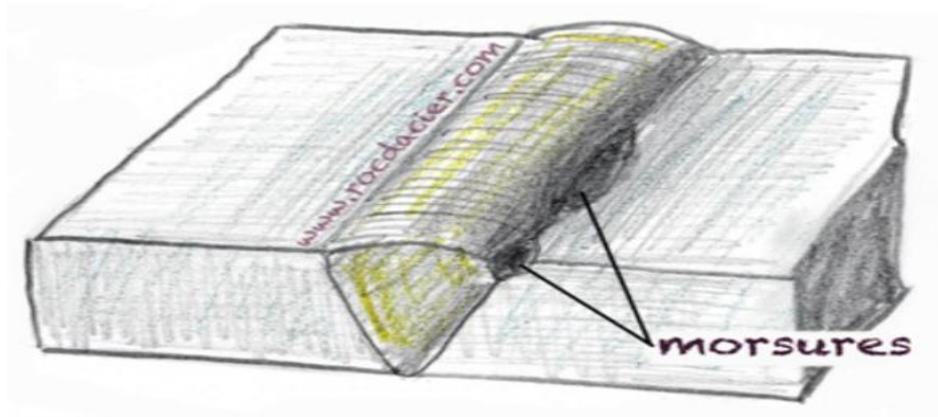


Figure IV. 23: Morsures

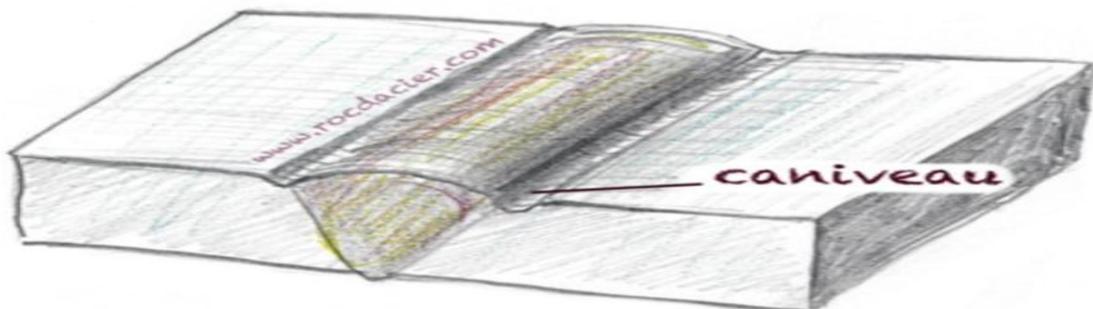


Figure IV. 24: Caniveau

IV.15. Défauts géométriques des cordons

Défaut de convexité :

Il s'agit d'un excès de matière sur la longueur de la soudure, ou localisé. Les normes imposent des limites d'épaisseur pour le cordon. Si le cordon est trop bombé et dépasse ces limites, alors il y a défaut de convexité.

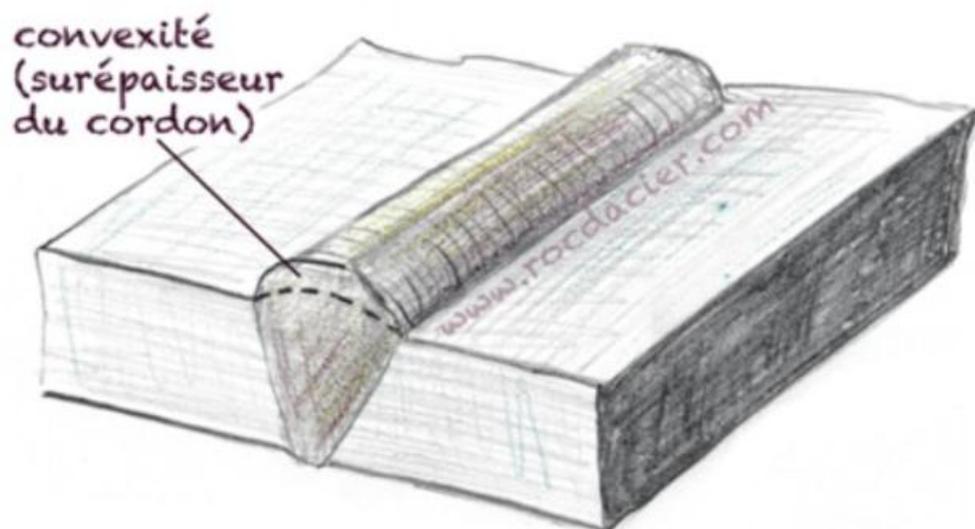


Figure IV. 25: Convexité

IV.16. Défaut de concavité

Il s'agit d'un **manque de matière** sur la longueur de la soudure, ou localisé. Si le cordon est trop creux et dépasse les limites des normes, alors il y a **défaut de concavité**.

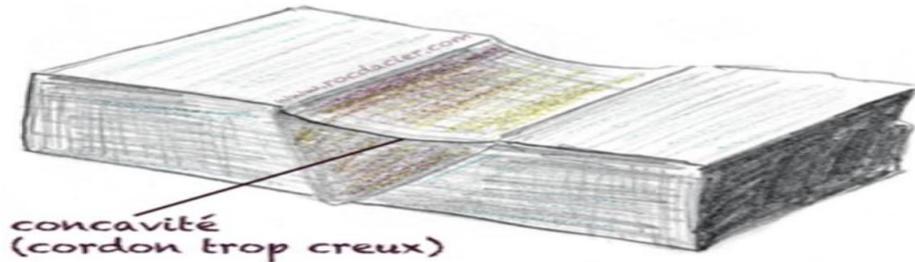


Figure IV. 26: Concavité

IV.17. Défaut d'alignement

Lorsque les pièces sont mal bridées et/ou le pointage insuffisant, on peut avoir un **défaut d'alignement**.

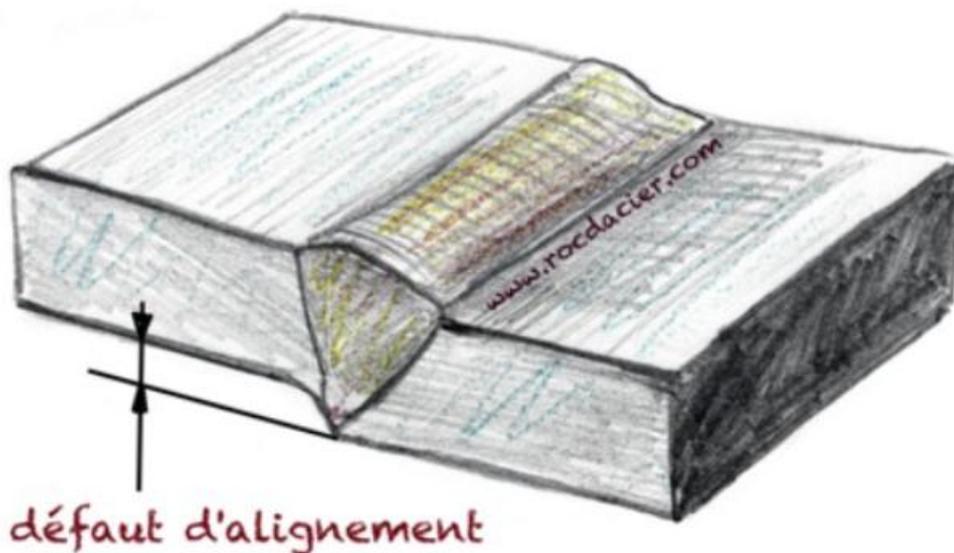


Figure IV. 27: Défaut d'alignement

IV.18. Déformations angulaires

Les déformations importantes de l'opération de soudage peuvent aussi entraîner un **défaut angulaire**. Les pièces assemblées ne respectent pas la forme souhaitée.

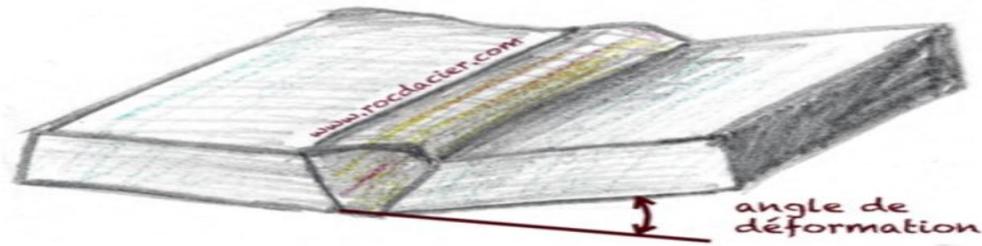


Figure IV. 28: Déformation angulaire

IV.19. Les déformations de soudage

Les déformations liées au procédé de soudage sont fonction de type de soudure. Figure 4 se trouvent les déformations lors du soudage d'un joint en V ; les déformations durant un assemblage en T sont figure

Avant soudage	Après soudage

Figure IV. 29: Déformations de soudage de joint V

Avant soudage	Après soudage
	<p>Une passe de soudage</p>
	<p>Trois passes de soudage</p>

Figure IV. 30: Déformations de soudage d'assemblages en T

Plusieurs méthodes existent pour éviter les déformations de soudage comme de prévoir une préparation adéquate des joints, une vitesse de soudage la plus rapide possible et une réduction du nombre de passes de soudage au minimum. D'autres méthodes incluent le préchauffage, le chauffage, le bridage et le pointage.

IV.20. Contrôle avant le soudage

Le contrôle avant le soudage a pour but de prévenir des défauts. Il portera sur :

- Qualité du métal.
- Préparation des pièces a soudées.

Les traitements thermiques (post et préchauffage, maintien en température).

- Matériel de soudage (état, puissance, réglage).
- Qualification du soudeur.

IV.7.2. Contrôle au cours du soudage

Le contrôle au cours de soudage a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joint sont bien respectées. Il portera sur :

- Nature et la dimension du métal d'apport.
- Réglage de l'appareil du soudage.
- Etat du joint réalisé.
- Disposition des passes nombre et sens de réalisation.
- Déformations.
- Maintien en température.

IV.20.1. Contrôle après le soudage

Ces contrôles ont un double but, soit la vérification de la soudabilité à partir des essais qui doivent être exécutés dans les mêmes conditions que l'ensemble à réaliser (procédés, matériaux, épaisseurs, paramètres, séquences et main-d'œuvre), soit la vérification de la qualité des joints par un contrôle effectué soit sur la totalité des soudures, soit localement dans les zones les plus propices à l'apparition des défauts ou, si cela est possible par des essais sur pièces témoins placées par exemple à l'extrémité du joint, comme s'il était une partie intégrale de l'ensemble. Il y'a deux groupes principaux de méthodes de contrôle :

- Contrôle destructif : (essai de texture, essais mécaniques : pliage, résilience).

- Contrôles non destructifs : (examen visuel, ressuage, rayons X, rayon gamma, courants de Foucault, ultrason).

Contrôle semi destructif : il se pratique en perçant ou en fraisant localement le joint soudé en vue d'examiner les parois assemblées. La forme de l'entaille doit naturellement être telle que sa réparation soit aisée. Cette méthode permet d'apprécier :

- La pénétration de la soudure
- La liaison des bords
- Les défauts physiques du joint au droit de la cavité

Contrôles non destructifs : il permet de vérifier la qualité de la soudure sans en corrompre la qualité

- Contrôle visuel : présence d'éventuels caniveaux, surépaisseurs des soudures bout à bout, valeur de gorge des soudures d'angles, défauts de surface

Principe du contrôle

Ce contrôle porte essentiellement sur la forme générale des cordons, à savoir :

- Les dimensions géométriques (gorge dans le cas d'une soudure d'angle, surépaisseur...).
- L'aspect du cordon (stries de solidification).
- Les défauts visibles (caniveaux, irrégularités de fusion,...).

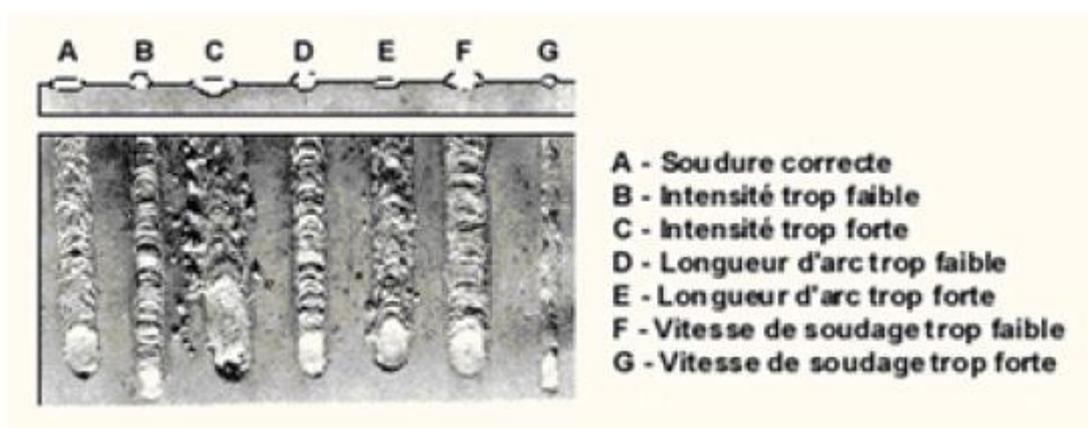


Figure IV. 31: Contrôle visuel du soudage manuel à l'électrode enrobée

Cette méthode est caractérisée par les points suivants :

- L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité, qui permet à un opérateur averti de se faire une opinion :
 - Sur la qualité du cordon,
 - Sur le choix de la procédure de soudage,
- Sur la compétence du soudeur.
- Elle permet également de déclencher des contrôles plus approfondis.
- En aucun cas, elle ne permet de connaître la qualité interne d'une soudure.

IV.20.2. Mise en oeuvre du contrôle

Par définition, le contrôle s'effectue à l'oeil nu, mais dans certains cas l'opérateur peut avoir recours à des moyens complémentaires :

- Jauges ou calibres pour mesurer les gorges, les surépaisseurs, ...
- Loupes pour la recherche de défauts débouchants (fissures, manque de fusion,...),
- Miroirs ou endoscopes pour observer des zones non accessibles à l'oeil.

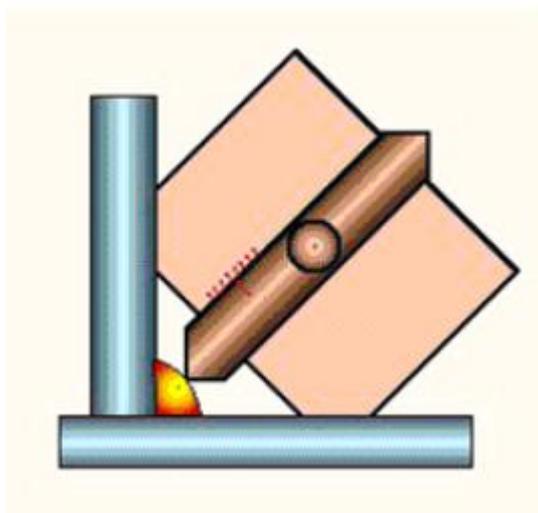


Figure IV. 32: Exemple de jauges de contrôle

IV.20.3. Ressuage

Cette méthode permet de mettre en évidence les défauts débouchant en surface. La surface est nettoyée, puis enduite d'un produit pénétrant, et enfin parfaitement essuyée pour enlever l'excès

de liquide. Une mince couche de talc est répandue sur la surface à contrôler laissant apparaître des traces rouges au droit des défauts.

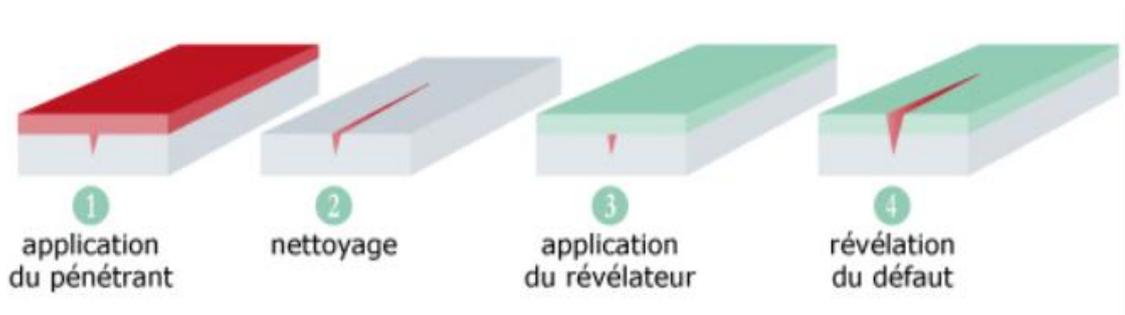


Figure IV. 33: Schéma d'un control par ressuage.

IV.20.4. Fluorescence

Même principe que pour la méthode de ressuage ; toutefois la composition du liquide est différente. Le talc est remplacé par un renforçateur. La surface éclairée par une lumière ultraviolette fait apparaître des traces jaunes sur fond très noir au droit des défauts.

IV.20.5. Contrôle magnétique (magnétoscopie)

On crée un champs magnétique perpendiculaire au défaut probable. Si la pièce est homogène et que sa perméabilité magnétique est constante, une poudre magnétique déposée à sa surface va se répandre uniformément. Au contraire, à l'endroit d'un défaut, il y a apparition d'un flux de fuite mis en évidence par une concentration de poudre magnétique à cet endroit. Ce phénomène se produit que le défaut débouche ou non en surface.



Figure IV. 34: Contrôle par magnétoscopie

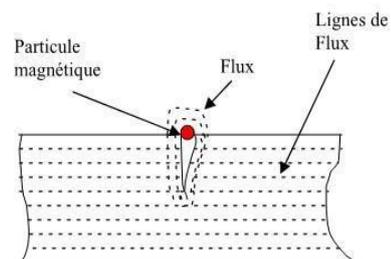


Figure IV. 35: Banc de magnétoscopie

IV.20.6. Contrôle radiographique

Utilisé pour révéler les anomalies volumiques. La pièce à contrôler est soumise à un rayonnement X ou g. En plaçant un film derrière la pièce, celui-ci va être impressionné par les

rayonnements traversants. Toutefois l'intensité de celui-ci va différer au droit des défauts. Cela se traduira par une tache plus sombre ou plus claire que la teinte générale du film. Cette technique demande un matériel lourd et présente des risques potentiels pour le personnel.



Figure IV. 36: Contrôle par courant de Foucault.

IV.20.7. Ultrasons

- **Principe :**

Le procédé consiste à envoyer dans l'échantillon à examiner, une onde ultrasonore créée par un palpeur (traducteur). Les défauts, manque de matière ou hétérogénéités (appelés communément interfaces) renvoient une partie du faisceau ultrasonore vers le palpeur qui est également récepteur. Le positionnement du défaut est connu avec précision grâce à la connaissance de la vitesse des ultrasons dans la matière considérée et le temps correspondant à l'aller-retour de l'onde ultrasonore : surface de la pièce, vers défaut, vers surface de la pièce.



Figure IV. 37: Contrôle de pièce fonderie.

CONCLUSION GENERALE

Au début, nous avons donné sur idée générale sur la production et l'utilisation des cuves de stockagesous pression des fluides et des gaz. Notre objectif était d'étudier les cuves sous pression et de mieux comprendre les paramètres de construction ainsi que les procédés de soudures pour une conception fiable.

Le dimensionnement d'une cuve est une étape délicate nécessitant un savoir-faire pointupour répondre aux exigences des normes et de la réglementation en vigueur. La prise en charge du volet sécurité est primordiale et nécessite des réflexions qui dépassent l'étude à l'utilisation finale pour se rendre compte de toutes les éventualités et d'éviter les défaillances. On remarque que la construction d'une cuveest basée sur les calculs théoriques, ainsi que la prise en compte du volet pratique. Cependant, la fabrication dépend des matériaux utilisés et de la qualification des ouvriers et des contrôleurs.

L'autre point que nous avons traité concerne la théorie de conception d'une cuve sous pression. A l'aide des différents calculs, nous avons pu déterminer les caractéristiques de la cuve ainsi que les tubulures (dimensions de la cuve, viroles, fonds bombés, épaisseurs, surfaces de pressions internes, etc ...).

Ensuite et concernant les assemblages, nous avons axé notre travail surtout sur le volet soudures sous différentes formes ainsi que les anomalies qui peuvent en découler. Dans notre cas, nous avons opté pour la soudure bout-à-bout en « V » ou en « X ». D'ailleurs, même les calculs ont confirmé parla suite que le choix de ces types de soudures était correct.

Enfin et pour avoir une idée plus claire et précise sur les résultats obtenus par calculs, nous avons effectué une simulation à l'aide du logiciel « Solid Works » et dont les résultats ont montré que les contraintes, les déformations et les déplacements étaient largement admissibles.

Nous espérons qu'à travers ce modeste travail, avoir contribué à mieux connaître et faire connaître lecomportement des cuves à pressions ainsi que leur dimensionnement.

Références bibliographiques

Chapitre1 :

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9servoir_sous_pression#:~:text=Un%20r%C3%A9servoir%20sous%20pression%20est,est%20fabriqu%C3%A9%20par%20enroulement%20filamentaire.
- [2] <https://conseils.hellopro.fr/quel-fabricant-pour-une-cuve-sous-pression-1517.html>
- [3] <https://www.labbe-france.fr/cuve-inox/cuve-sous-pression/>
- [4] <https://www.wattco.com/fr/casestudy/cuves-sous-pression/>

Chapitre2 :

- [5] PDF "PDHonline Course M398 (3 PDH) ASME Section I & Section VIII Fundamentals" by VALTER NAGAMATI < updates@academia-mail.com > /2012
- [6] Société d'engineering et de construction métallique – METALENG filiale du groupe E.N.C.C / Note de calcul d'une cuve sous pression _ 19/12/2017.
- [7] Entreprise Nationale de charpente et de chaudronnerie E.N.C.C unité CR Métal / Siège : Avenue KRITLI MOKHTAR BP 01 Blida (09000) Algérie / note de calcul cuve sous pression terre-capacité 20 m³.
- [8] [ASME VIII Div.1-2010\[1\].pdf](#)
- [9] <https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/KEY-CHANGES-TO-2021-BOILER-CODE-CSA-GROUP-FINAL-FR.pdf>

Chapitre3 :

- [10] <https://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>
- [11] Entreprise Nationale de charpente et de chaudronnerie E.N.C.C unité CR Métal / Siège : Avenue KRITLI MOKHTAR BP 01 Blida (09000) Algérie / CONCEPTION DE SOLIDWORKS.

Chapitre4 :

- [12] Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MI'10 _2010 / Centre de Recherche en Technologies Industrielles - CRTI - www.crti.dz.
- [13] PDF Pressure vessels (page 44 Tuesday 31 Mai 2011. 8.2pm)/www.learneasy.com.
- [14] A.Dhooge, Techniques d'assemblage : le soudage ; Métallier 65, spécial soudage, avril 2004.

- [15] J.Barralis et G.Maeder, Métallurgie, élaboration, structures, propriétés, normalisation, Afnor, Edition Nathan, septembre 2004.
- [16] <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8367/8367-les-principaux-defauts-et-risques-lies-au-soudage-ensps.pdf>
- [17] <https://www.alticontrol.com/ressuage/>
- [18] <https://notech.franceserv.com/soudure-controle.html>
- [19] <https://www.dvai.fr/blog/virole-inox-concept-de-fabrication-2/#:~:text=Pour%20r%C3%A9aliser%20une%20virole%2C%20nous,de%20la%20t%C3%B4le%20C3%A0%20plat.>
- [20] <https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>
- [21] <https://www.dvai.fr/virole/>
- [22] <https://www.rocdacier.com/defauts-des-soudures/>
- [23] <https://organicindiatoday.com/fr/diff%C3%A9rents-types-de-joints-de-soudure/>
- [24] <https://www.olympus-ims.com/fr/vessel-inspection-solutions/>
- [25] <https://www.itwpc.com/produits/detecteur-de-fissures-penetrant>
- [26] <https://fr.dreamstime.com/contr%C3%B4le-radiographique-des-soudures-canalisation-apr%C3%A8s-transport-image121698811>