



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité: Génie Mécanique**

**Option: Génie Des Matériaux**

# Modélisation et simulation des structures tubulaires soudées

Réalisé par : - KHELLAF Noura  
- SEKKIOU Hassina

Dirigé par : M. CHITOUR Mourad

Co-Dirigé par :

Membres de jury :

- M. KHADRAOUI .F    MAA    Président
- M. BERKIA .A/ H    MAA    Examineur

Présenté le : 21 juin 2018

2017/2018

## *Remerciement*

*Nous tenons tout d'abord a remercier dieu le tout puissant et  
miséricordieux*

*Lui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste  
travail*

*En second lieu, nous tenons a remercier notre encadreur :*

*Mr, CHITOUR MOURAD*

*Pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du  
travail*

*Nous adressons notre profonde gratitude a l'ensemble du corps  
enseignant de l'université ABBES LAGHROUR ayant  
contribué a notre formation*

*Que les membres du jury trouvent ici le témoignage de notre  
reconnaissance*

*Pour*

*A voir bien voulu juger notre travail*

*Nos remerciements vont aussi a nos familles et a nos amies et tous  
ceux qui ont*

*Contribué de près ou de loin a la réalisation de ce mémoire,*

# SOMMAIRE

**SOMMAIRE**

|  |          |
|--|----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>   | <b>2</b> |
| <b>PARTIE I : GENERALITE SUR LES STRUCTURE TUBULAIRE</b>                       |          |
| I.1. FABRICATION ET CONTROLE DES TUBES .....                                   | 4        |
| I.1.1. Introduction.....   | 4        |
| I.1.2. LES TUBES SOUDES .....  | 4        |
| I.1.2.1. Les tube soudés sous forme spirale .....                              | 4        |
| I.1.2.2. Les tube soudés sous forme longitudinale .....                        | 7        |
| a) Le formage.....   | 9        |
| b) Le soudage .....  | 9        |
| c) L'Expansion et calibrage .....  | 9        |
| d) La largeur du feuillard .....   | 11       |
| I.1.3. LES TUBES REALISES SANS SOUDURE .....                                   | 11       |
| I.1.4. MODES DE RACCORDEMENT DES TUBES .....                                   | 12       |
| I.1.5. CARACTÉRISTIQUES DES TUBES .....  | 12       |
| I.1.6.LES ACIERS .....   | 13       |
| I.1.6.1. DÉFINITION DE L'ACIER .....   | 14       |
| I.1.6.2. ACIER DE CONSTRUCTION .....   | 15       |
| I.1.6.3. LE MATÉRIAU ÉTUDIÉ S355 .....   | 15       |
| I.1.6.4.COMPOSITION CHIMIQUE ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET THERMOPHYSIQUES ..... | 16       |
| A. Composition chimique.....   | 16       |
| B. Caractéristiques mécaniques .....   | 16       |

## **SOMMAIRE**

|   |    |
|---|----|
| C. Caractéristiques thermo physiques .....          | 17 |
| D. Leurs propriétés principales .....               | 17 |
| I.1.7.LES ESSAIS DESTRUCTIFS .....                  | 17 |
| I.1.7.1. Essai de traction sur bague .....          | 17 |
| I.1.7.2. Essais d’aplatissement .....               | 19 |
| I.1.7.3. Essais d’évasements .....                  | 20 |
| I.1.7.4. Essai de pression interne .....            | 20 |
| I.1.7.5. Essai de corrosion .....                   | 21 |
| I.1.8. CONTROLESNON- DESTRUCTIFS .....              | 21 |
| I.1.8.1.Visuels .....                               | 22 |
| I.1.8.2. Par ressuage .....                         | 22 |
| I.1.8.3. Magnétoscopie.....                         | 23 |
| I.1.8.4. Ultrason.....                              | 23 |
| I.1.8.5. Rayons X et gamma .....                    | 24 |
| I.2.STRUCTURE TUBULAIRE.....                        | 26 |
| I.2.1. Introduction.....                            | 26 |
| I.2.2.Classification des structures tubulaires..... | 27 |
| I.2.2.1. Structures soudées simples.....            | 27 |
| I.2.2.1.1.Nœuds de types T et Y .....               | 28 |
| I.2.2.1.2.Nœuds en X.....                           | 28 |
| I.2.2.1.3.Nœuds en N, K et KT.....                  | 28 |

|   |    |
|---|----|
| a) Excentrement.....  | 29 |
| b) Espacement, recouvrement .....   | 29 |
| c) Valeurs usuelles des paramètres géométriques .....   | 30 |
| I.2.2.1.4. Nœuds de géométrie complexe.....   | 30 |
| I.2.2.1.5. Nœuds avec recouvrement.....   | 31 |
| I.2.2.1.6. Nœuds avec plusieurs piquages de tube .....  | 33 |
| I.2.2.1.7. Nœuds avec raidisseurs.....  | 33 |
| I.2.2.1.8. Nœuds avec raidisseurs.....  | 34 |
| I.2.2.1.9. Dispositions constructives générales des nœuds.....  | 37 |
| I.2.2.1.10. Conditions géométriques dans la constitution d'un nœud.....   | 37 |
| I.2.2.2. Structures multi plans.....  | 38 |
| I.2.2.3. Structures renforcées.....   | 39 |
| I.2.2.4. Structures fondues.....  | 39 |
| I.2.2.5. Structures composites.....   | 40 |
| I.2. 3. Les thèmes étudiés dans le domaine des jonctions tubulaires .....   | 40 |
| I.2.4. Contraintes dans les jonctions tubulaires.....   | 40 |
| I.2.4.1. Mode de chargement.....  | 40 |
| I.2.4.2. Contrainte locale.....   | 42 |
| I.2.4.2.1. Définition de la contrainte de dimensionnement et<br>du coefficient de Concentration de contrainte pour un chargement donné..... | 42 |
| I.2.4.2.2. Influence des paramètres géométriques sur<br>la valeur de la contrainte de dimensionnement ( $\sigma_G$ ).....                   | 43 |

|   |    |
|---|----|
| I.2.4.2.3.Facteur de concentration de contrainte.....   | 43 |
| I.2.5.Technique d'assemblage de tubes.....  | 44 |
| I.2.5.1.Assemblage par soudage traditionnelle.....  | 44 |
| I.2.5.2.Assemblage par pré-perçage.....   | 45 |
| I.2.5.3.Amélioration du pied du cordon de soudure par l'emploi<br>de procédés de soudage appropriés.....    | 46 |
| I.2.5.4.Conditions relatives à la préparation des bords des tubes<br>et au profil du cordon de soudure..... | 47 |
| I.2.5.5.Dimensionnement des assemblages uni plans (X, T, K).....  | 49 |
| <br><b>PARTIE II: MODELISATION DES STRUCTURES</b>   |    |
| II.MODELISATION DE LA STRUCTURE TUBULAIRE ETUDIEE.....  | 51 |
| II.1 Objectif.....  | 51 |
| II.2.INTRODUCTION .....   | 51 |
| II.3.CONDUITE DE LA SIMULATION .....  | 52 |
| II. 3.1. Présentation générale d'abaque .....   | 52 |
| II.3.2. Le code de calcul abaqes .....  | 53 |
| II.3.2.1.Structure générale d'un code de calcul.....  | 55 |
| II. 4 .Méthodologie.....  | 55 |
| II.5. Géométrie de la structure étudiée.....  | 55 |
| II.6.Paramètres de la structure tubulaire soudée en T étudiée.....  | 56 |
| II.7. Chargement appliqué à la structure.....   | 58 |
| II.8. Conditions aux limites.....   | 59 |

## **SOMMAIRE**

|  |    |
|--|----|
| II.8.1. Etapes du processus de modélisation..... | 59 |
| II.8.2. Discrétisation .....                     | 61 |
| II.9. RESULTATS.....                             | 62 |
| 1. CAS DE TRACTION.....                          | 62 |
| 2. CAS DE FLEXION DANS LE PLAN.....              | 65 |
| 3. CAS DE FLEXION HORS DE PLAN.....              | 67 |
| II.10. Conclusion.....                           | 70 |
| CONCLUSION GENERALE .....                        | 72 |

# LISTE DE FIGURE

**Liste des figures**

**PARTIE I : GENERALITE SUR LES STRUCTURE TUBULAIRE**

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1. De la plaque au tube.....  | 4  |
| Figure I.2.Procédé de fabrication des tubes soudés en spirales .....                               | 5  |
| Figure I.3 : L'angle d'introduction de la bande.....   | 6  |
| Figure I.4. La bobine en bande pour la forme spirale.....  | 6  |
| Figure I.5. Déroulement des bobines .....  | 6  |
| Figure II.6. Cintreuse .....   | 7  |
| Figure II.7. Soudage Internes.....   | 7  |
| Figure I.8.Formage en U, formage en O, et soudage de la fabrication des tubes soudent en long..... | 8  |
| Figure I.9. Mise en forme des tubes par le procédé « UOE ».....                                    | 9  |
| Figure I.10. Soudage et finition des tubes par le procédé « UOE ».....                             | 9  |
| Figure I.11. Machine d'expansion .....   | 10 |
| Figure I.12. Chan freinage et dressage .....   | 10 |
| Figure I.13. La largeur du feuillard.....  | 11 |
| Figure I.14. Obtention des tubes sans soudure.....   | 11 |
| Figure I.15.Raccords de tuyaux.....  | 12 |
| Figure I.16 .Caractéristiques Des Tubes.....   | 13 |
| Figure I.17. Contraintes déformation spécifique aciers Fe E235 et Fe E355.....                     | 14 |
| Figure I.18.Courbe de traction de l'acier S355.....  | 16 |
| Figure. I.19. Traction transversale (traction sur bague.....                                       | 18 |

## ***LISTE DE FIGURE***

|   |    |
|---|----|
| Figure I.20. Tube aplatie Machine de l'aplatissement.....   | 19 |
| Figure I.21. L'essai d'aplatissement.....   | 19 |
| Figure I.22. Tube évasé et Machine d'évasement.....   | 20 |
| Figure I.23. Principe d'évasement.....  | 20 |
| Figure I.24. Essai de pression interne.....   | 21 |
| Figure I.25. Contrôle de soudures par ressuage.....   | 22 |
| Figure I.26. Contrôle par magnétoscopie .....   | 23 |
| Figure I.27. a) Contrôle aux ultrasons et b) Contrôle aux ultrasons avec têtes de contrôle fixe et tube rotatif ..... | 24 |
| Figure I.28. Radiographie d'une soudure longitudinale sur un tube en acier.....                                       | 25 |
| Figure I .29: Plateforme de forage CFEM T 2005 Auto élévatrice .....  | 26 |
| Figure I .30 : Soudage des éléments tubulaire d'une plateforme offshore .....   | 26 |
| Figure I .31: Formes des jonctions soudées simples .....  | 27 |
| Figure I .32: Nœuds en T et en Y .....  | 28 |
| Figure I .33: nœuds en X .....  | 28 |
| Figure I .34: Nœuds en N, K et KT.....  | 28 |
| Figure I .35: Excentrement.....   | 29 |
| Figure I .36: Espacement, recouvrement.....   | 29 |
| Figure I .37: Nœud avec recouvrement (entretoises et membrure dans un même plan) .....                                | 31 |
| Figure I .38: Nœud avec recouvrement (entretoises et membrure dans des plans différents).....                         | 32 |

## ***LISTE DE FIGURE***

|  |    |
|--|----|
| Figure I .39: Présence d'une zone de liaison continue entretoises- membrure.....   | 32 |
| Figure I .40: Nœuds avec plusieurs piquages de tubes.....  | 33 |
| Figure I .41: Nœuds avec raidisseurs.....  | 36 |
| Figure I .42: Zones critiques de concentrations de contraintes.....  | 36 |
| Figure I .43: dimensionnement du recouvrement.....   | 38 |
| Figure I .44: Jonctions multi plans.....   | 38 |
| Figure I .45: Jonctions renforcées.....  | 39 |
| Figure I .46: Jonction fondue.....   | 39 |
| Figure I .47: Jonctions composites .....   | 40 |
| Figure I .48: définitions des points de rupture en fatigue dans un assemblage en T soumis une traction et une flexion..... | 41 |
| Figure I .49 : Représentation des concentrations de contraintes dans une structure tubulaire soudée.....                   | 44 |
| Figure I .50 : Représentation des caractéristiques du cordon de soudure Dans la zone de concentration de contraintes.....  | 44 |
| Figure I .51: Technique d'assemblage traditionnelle.....   | 45 |
| Figure I .52 : Positions avant et après soudage d'un tube en T .....   | 45 |
| Figure I .53 : Soudage d'éléments tubulaires .....   | 45 |
| Figure I .54: Technique d'assemblage par pré-perçage de la membrure .....  | 46 |
| Figure I .55: Préparation et profil des cordons de soudure.....  | 47 |
| Figure I .56: Règles de préparation et profil des cordons de soudures .....  | 47 |
| Figure I .57: Conditions de sillon.....  | 48 |

**PARTIE II : MODELISATION ET SIMULATION DES STRUCTURES**

Figure. II.1 : Structure d'une analyse ABAQUS.....52

Figure. II.2 : Structure générale d'un code.....54

Figure II. 3 : a et b Géométrie de la structure étudié.....55

Figure II. 4 : Géométrie e de la membrure .....56

Figure II. 5 : Géométrie de l'entretoise.....57

Figure II. 6 : Géométrie de la structure .....57

Figure II. 7 : Sollicitation prises en compte dans les formules de résistance statique.....58

Figure II. 8 : Conditions aux limites.....59

Figure II.9: Organigramme général pour la résolution d'un problème avec Consol Multiphasiques .....60

Figure II 10: Modèle discrétisé.....61

Figure II .11: Distribution des contraintes V. Mises.....62

Figure II .12: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{xx}$  .....62

Figure II .13: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{yy}$  .....63

Figure II .14: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{zz}$  .....63

Figure II .15: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xy}$  .....63

Figure II .16: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xz}$  .....64

Figure II .17: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{yz}$  ..... 64

Figure II .18: Distribution des contraintes V. Mises .....65

Figure II .19: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{xx}$  ..... 65

Figure II .20: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{yy}$  .....66

## ***LISTE DE FIGURE***

|  |    |
|--|----|
| Figure II .21: Distribution des contraintes normale $\sigma_{ZZ}$ .....      | 66 |
| Figure II .22: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{xy}$ ..... | 66 |
| Figure II .23: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{xz}$ ..... | 67 |
| Figure II .24: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{yz}$ ..... | 67 |
| Figure II .25: Distribution des contraintes V. Mises .....                   | 67 |
| Figure II .26: Distribution des contraintes normale $\sigma_{xx}$ .....      | 68 |
| Figure II .27: Distribution des contraintes normale $\sigma_{yy}$ .....      | 68 |
| Figure II .28: Distribution des contraintes normale $\sigma_{zz}$ .....      | 68 |
| Figure II .29: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{xy}$ ..... | 69 |
| Figure II .30: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{xz}$ ..... | 69 |
| Figure II .31: Distribution des contraintes tangentielle $\sigma_{yz}$ ..... | 69 |

# **LISTE DES TABLEAUX**

**Liste des tableaux**

**PARTIE I : GENERALITE SUR LES STRUCTURE TUBULAIRE**

Tableau I.1. Caractéristique des principaux aciers de construction.....14

Tableau I.2. Composition chimique de l'acier S355 (% massique).....16

Tableau I.3. Valeurs limites des paramètres géométriques.....30

Tableau I.4 distance est assurée par calage et pointage..... 47

Tableau I.5 fonction de l'angle  $\psi$ .....48

**PARTIE II : MODELISATION ET SIMULATION DES STRUCTURES**

Tableau II.1 : Paramètre de la structure tubulaire.....56

Tableau II.2 : caractéristiques mécaniques.....58

Tableau II.3 : Résultat des Contrainte.....70

**NOTATIONS**

**H** : hauteur qu'il ne faut pas dépasser pendant l'essai d'aplatissement.

**T** : épaisseur de tube.

**D** : diamètre extérieur de tube.

**K** : constante en fonction des matériaux

**$\sigma_G$** : Contrainte géométrique de dimensionnement

**$\sigma_{nom}$**  : la contrainte nominale

**$\sigma_N$** : Contrainte Nominale

**$\sigma_{max}$** : Contrainte principale maximale

**$\sigma_L$**  : Contrainte locale

**C.C.C** : coefficient de concentration de contrainte

**$K_t$**  : Facteur de concentration de contrainte

**S-N** : Stress nombre of cycle

**$N_x$** : Effort normal

**$M_y$**  Moment fléchissant dans le plan

**$M_z$**  : Moment fléchissant hors du plan

**CIDECT** : Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire

**$\Phi_i$** : Angle de positionnement

**$\rho$** : rayon au pied de cordon

**$\psi$** : l'angle de raccordement

**$Q_r$** : est un facteur de réduction égal à 0.625

**f** : facteur correspondant au chargements : axial, flexion dans le plan ou flexion hors du plan, valant respectivement : 1 ; 0.66 et 1.5

**E** : module de Young du matériau

**$\nu$** : Coefficient de Poisson

**$E_n$**  : déformation nominale

**$\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$**  : contraintes de déformation

**x** : longueur du pied du cordon de soudure coté membrure

# **INTRODUCTION GENERALE**

### **INTRODUCTION GENERALE**

Dans ces dernières décennies, les assemblages tubulaires soudés occupent une part considérable dans plusieurs domaines de construction métallique. On cite, entre autres, les supports de plateformes offshore, les pipelines, les tripodes de transport d'énergie électrique, les mâts des réseaux de télécommunication, etc... Ces structures sont constituées généralement d'un grand nombre d'éléments structuraux tubulaires assemblés entre eux par soudage en constituant des jonctions tubulaires soudées de formes géométriques, parfois, très complexes. Cette complexité géométrique peut provoquer des contraintes locales de grandes amplitudes pouvant endommager toute la structure soit par phénomène de fatigue soit par plastification en commençant par le point chaud.

Les assemblages tubulaires soudés sont très utilisés en construction métallique dans les ponts modernes, les tours et les ouvrages en mer tels que les plates-formes pétrolières Offshore de type Jacket destinées à l'exploitation des réserves d'hydrocarbures en milieu marin. Ils sont classés selon leur forme en T, Y, X, K, DT, DY, DK

L'assemblage soudé des membrures avec les montants et diagonales forme un nœud caractérisé par une rigidité variable, une distribution non uniforme des contraintes et un comportement tridimensionnel complexe, tout ceci pouvant s'avérer défavorable si l'assemblage est mal conçu ou mal réalisés et peut conduire à des ruptures de fatigue qui résultent des chargements cycliques auxquels est soumise la structure

Cette étude aborde l'effet de les charge de traction et de flexion (hors le plan ou dans le plan) dans les nœuds des assemblages tubulaires soudés en T des structures métalliques marines soumises aux sollicitations aléatoires dues aux éléments naturels (houle, vent, courant, ...)

Elle a pour objectif d'étudier la répartition des contraintes et localisation des points « chauds » (hot spot stresses) aux endroits critiques du point de vue de la fatigue dans les jonctions tubulaires soudées soumises à un chargement statique suivant la traction, la flexion dans le plan, la flexion hors du plan. Elle consiste donc à trouver un outil de simulation numérique permettant d'étudier et de prévoir le comportement de structures tubulaires soudées, par une modélisation simple et précise de la structure grâce à un code de calcul basé sur la méthode des éléments finis qui permettra de calculer la concentration de contraintes au voisinage du cordon de soudure.

**PARTIE I**  
**GENERALITE SUR LES STRUCTURES**  
**TUBULAIRES**

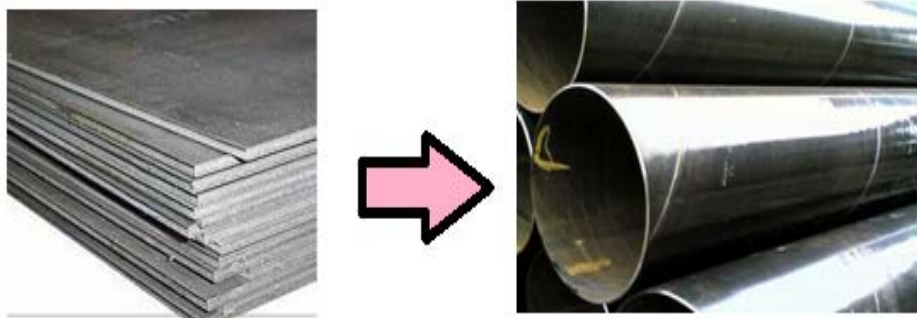
## I.1. FABRICATION ET CONTROLE DES TUBES :

### I.1.1. Introduction

La fabrication des tubes est la transformation des plaques d'acier en tubes en vue de son utilisation qui peut changer d'un produit à un autre et d'une région à une autre.

La diversité des diamètres et des épaisseurs de tubes ainsi que le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier. On retrouve [1].

- Les tubes soudés sous la forme en spirale.
- Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- Les tubes formés sans soudure.



*Figure I.1. De la plaque au tube [1].*

### I.1.2. LES TUBES SOUDES :

Les tubes métalliques soudés tiennent une place importante dans la production mondiale des tubes. Les tubes de grand diamètre, à partir de 0.5m environ, sont fabriqués à partir de feuillards enroulés en hélice puis soudés. Les tubes de diamètre inférieur à 0.5m sont également fabriqués à partir de feuillards qui subissent un formage continu dans le sens longitudinal avant que leurs bords soient soudés. Le soudage est exécuté principalement et de plus en plus par chauffage HF [2].

#### I.1.2.1. Les tubes soudés sous forme spirale :

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage où elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un

vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisée par l'inclinaison d'un angle  $\alpha$  entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube [3].

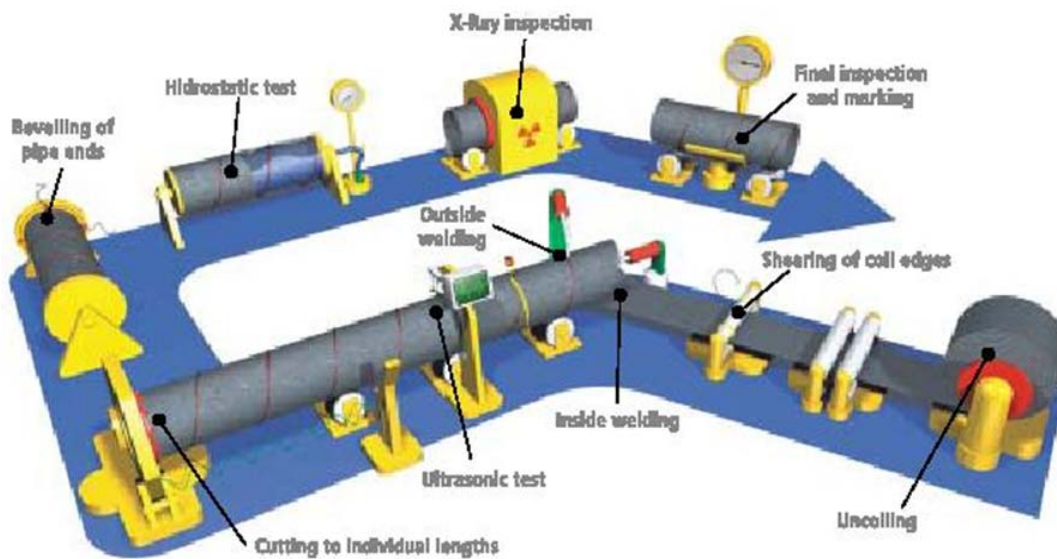


Figure I.2. Procédé de fabrication des tubes soudés en spirales [2].

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage, le restera par la suite. Pour des épaisseurs de paroi au-dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes. Ce procédé permet une exploitation économique et optimale de la largeur de bande, de par le rapport largeur de bande-diamètre allant jusqu'à environ 2,2 [1].

Le processus de formage ou de cintrage du tube est conditionné par l'angle d'introduction de la bande selon la relation :

$$\sin\alpha = \frac{B}{\pi \cdot D_{ext}} \quad (I.1)$$

Avec ;

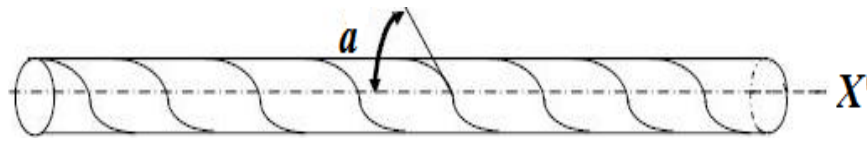
**B** : La largeur de bande

**Dext** : Le diamètre extérieur de tube formé

$\alpha$  : L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique (X'')

Les limites théoriques d'angle ne peuvent, en pratique, pas être exploitées. Si l'angle est trop aigu, il s'en suit une instabilité du processus de cintrage. Lors de la fabrication, les valeurs limites sont comprises entre 15° et 50°.

La gamme des diamètres, dans laquelle les tubes spiraux sont fabriqués s'étale de 400 à 3000 mm environ, avec des épaisseurs allant jusqu'à 30 mm [1].



**Figure I.3 :** L'angle d'introduction de la bande [1].

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes :

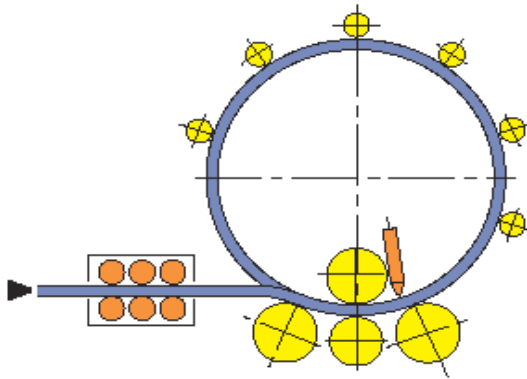
- La préparation de la bande
- La bande de raboutage
- Le cintrage
- Le soudage
- Le parachèvement
- La réception et inspection



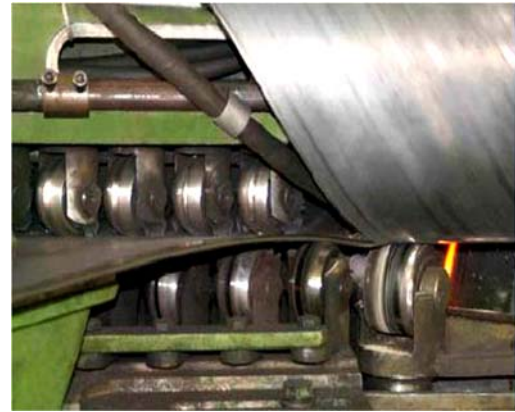
**Figure I.4.** La bobine en bande pour la forme spirale.



**Figure I.5.** Déroulement des bobines



*Figure I.6. Cintreuse [2].*



*Figure I.7. Soudage Internes [2].*

La préparation de la bande et des rives de la bande ainsi que des soudures de rabouillage influent directement sur la qualité du tube. A cause de l'importance, nous attachons à cette dernière, dans cet exposé, une attention particulière [1].

A l'entrée de la machine pour tubes spirale, on effectue les opérations suivantes :

- Déroulage de la bande
- Dressage de la bande de cisailage
- Chan freinage des rives de la bande
- Cambrage des rives pour éliminer l'effet de toit

L'entrée de la cage de formage, on effectue la passe intérieure de la soudure alors que la passe extérieure est effectuée sur le tube formé. Les procédés usuels pour la coupe sont:

- Oxycoupage
- Découpage au plasma [1].

**I.1.2.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale :**

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE", désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication ; le cloquage, la forme « U », la forme « O » et enfin l'expansion.

Ce procédé comporte trois étapes principales qui sont le formage, le soudage et l'expansion-calibrage.

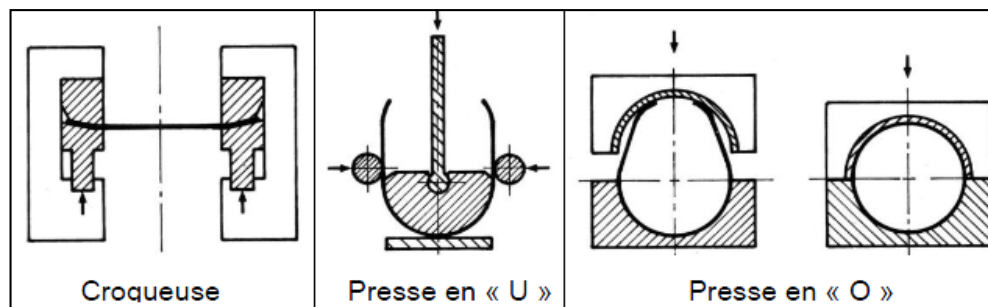


*Figure I.8. Formage en U, formage en O, et soudage de la fabrication des tubes soudés en long [4].*

Ce procédé comporte trois étapes principales qui sont le formage, le soudage et l'expansion-calibrage.

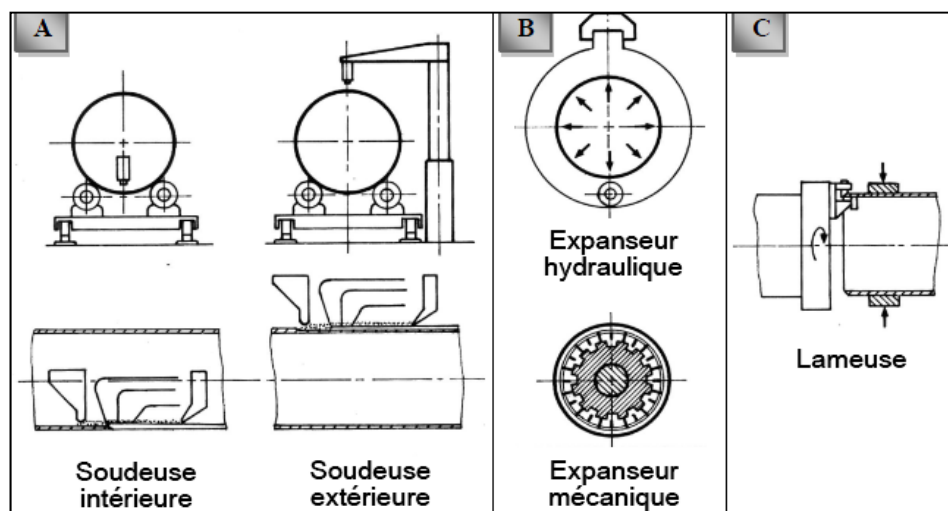
a) **Le formage** représente les trois étapes pour passer de la plaque à la forme cylindrique.

- Le croutage à l'aide d'une machine appelée croqueuse afin de fixer la plaque et d'amorcer le pliage
- La déformation en forme de « U » à l'aide d'une presse
- La déformation en forme de « O » toujours par une autre presse [1].



**Figure I.9.** Mise en forme des tubes par le procédé « UOE »,

b) **Le soudage** : du tube est effectué intérieurement et extérieurement à l'aide de têtes soudeuses automatiques en utilisant la technique de soudage à l'arc sous flux. Le cordon intérieur est en général réalisé le premier. (Partie A).

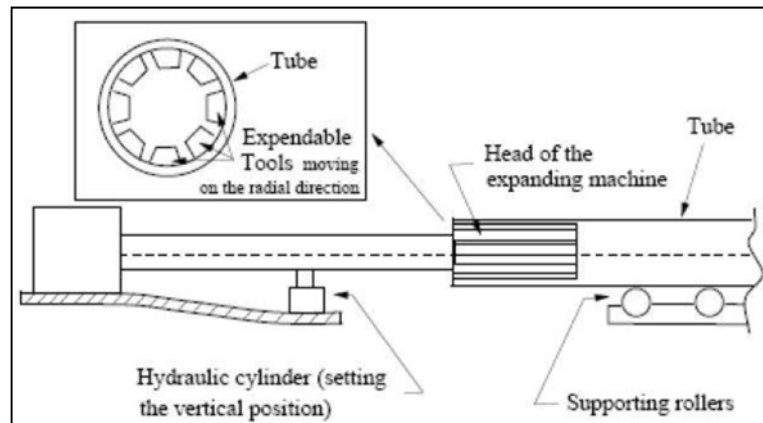


**Figure I.10.** Soudage et finition des tubes par le procédé « UOE » [1].

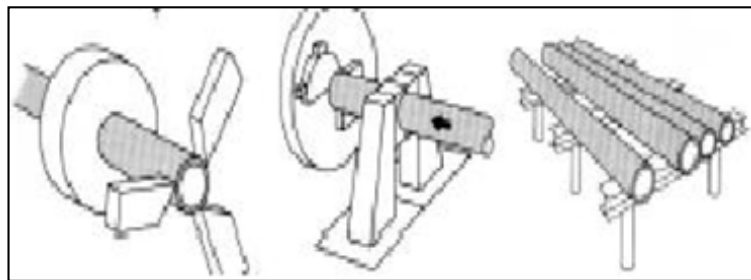
c) **L'Expansion et calibrage** : Dans le but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, les tubes après être soudés sont soumis à une expansion mécanique ou hydraulique

qui leur fait subir une augmentation de diamètre de 1 à 1.5 % (Partie B). Cette opération a pour conséquence de relaxer les contraintes résiduelles.

Enfin une opération de Chan freinage est effectuée par une la meus afin de faciliter le raccordement des tubes entre eux. (Partie C)[1].



*Figure I.11. Machine d'expansion [1].*



*Figure I.12. Chan freinage et dressage [2].*

d) **La largeur du feuillard** : La largeur du feuillard nécessaire en fonction du diamètre extérieur du tube est donnée par la formule suivante [2] :

$$B = (D - t + 2)\pi + N + \frac{1.5}{100} D \quad (1.2)$$

Où : **B** : est la largeur en (mm),

**D** : est le diamètre extérieur du tube en (mm),

**t** : est l'épaisseur du feuillard en (mm)

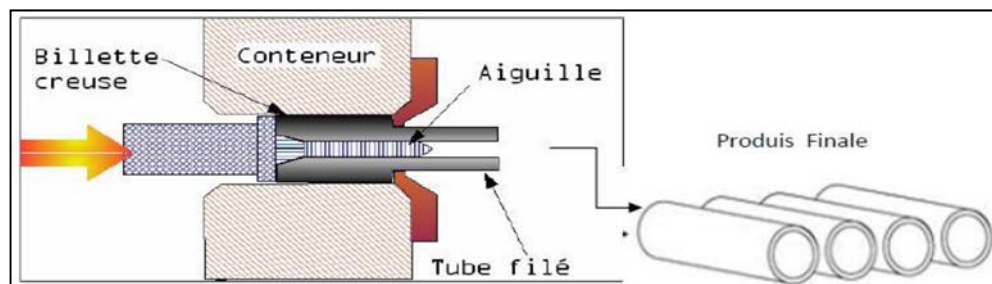
**N** : est un facteur déterminé par le diagramme.



*Figure I.13. La largeur du feuillard [2].*

### I.1.3. LES TUBES REALISES SANS SOUDURE :

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur de moins de 450 mm, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube se font de la façon suivante ; le métal est contenu entre la filière et l'aiguille, et par des pressions de poussées axiales, on obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe [1].







*Figure I.14. Obtention des tubes sans soudure*

### I.1.4. MODES DE RACCORDEMENT DES TUBES :

On peut réunir des tubes en utilisant les moyens suivants [4] :

- Raccords à compression ou évasés
- Accouplements à raccordement rapide
- Raccords soudés
- Raccords brasés
- Soudage
- Adhésifs

Raccords de tuyaux. On produit les raccords dans différentes dimensions et épaisseurs, en acier et alliages d'acier, Les extrémités sont généralement chanfreinées et prêtes pour le soudage

|   |   |   |   |  |   |   |
|---|---|---|---|--|---|---|
|    |    |    |    |     |    |    |
| coudes à 90°  | coudes à 90°  | coudes réducteurs à 90°   | coudes à 45° et 90° à long rayon  | coudes à 90°   | coudes à 45°  | retours à 180°  |
|  |  |  |  |  |  |  |
| retours à 180°  | té  | croisillons ou té double  | réducteurs concentriques  | réducteurs excentriques  | capuchons   | collets emboutis à assemblage à recouvrement  |
|  |  |  |  |  |  |  |
| raccords en «Y»   | mamelons profilés   | manchons  | sellettes de branchement  | anneaux de support   | bride à collet  | bride à trompe de dépression  |

*Figure I.15. Raccords de tuyaux [4].*

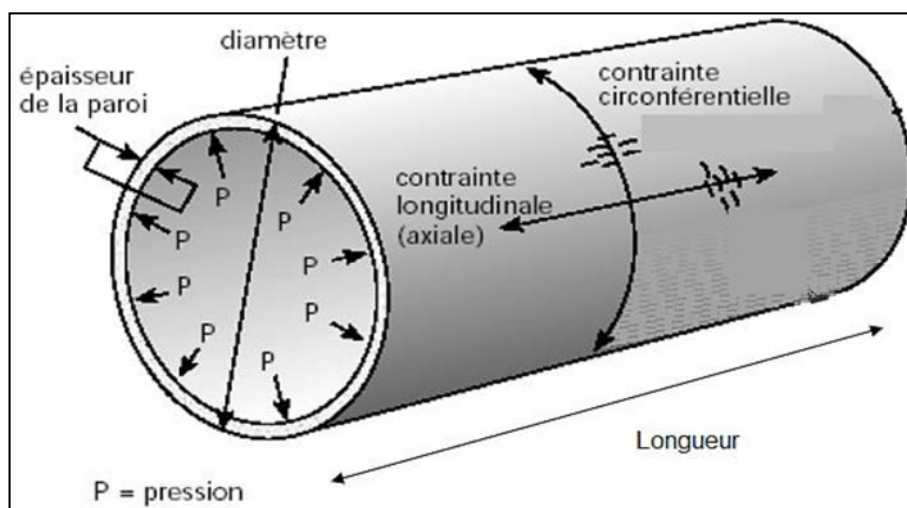
### I.1.5. CARACTÉRISTIQUES DES TUBES :

La plupart des tubes sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les structures tubulaires d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation [5].

Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques.

Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser.

Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères [5].



*Figure I.16 .Caractéristiques des Tubes*

### I.1.6.LES ACIERS :

Aciers pour constructions soudées Comme leur nom l'indique, les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.

- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire (wagons, etc.) [6].

### I.1.6.1. DÉFINITION DE L'ACIER :

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone qui détermine la nuance d'acier (le pourcentage du carbone est généralement inférieur à 1%).

Les caractéristiques mécaniques des aciers couramment employés sont données sur la figure I.16 [7].

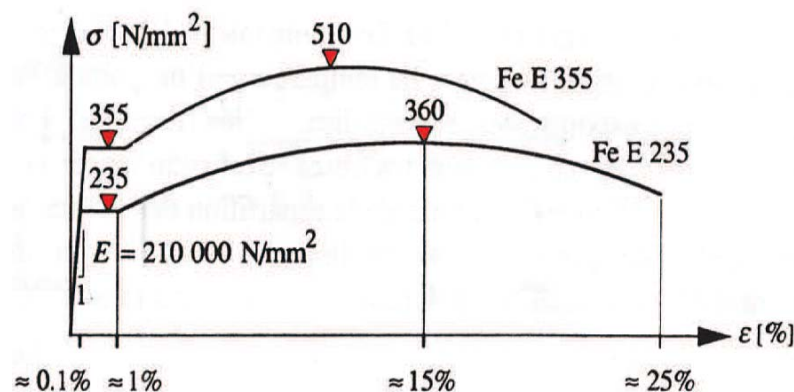


Figure I.17. Contraintes déformation spécifique aciers Fe E235 et Fe E355 [7].

Il existe plusieurs types de classification des aciers basée soit sur leur composition chimique, soit sur leurs caractéristiques mécaniques. La classification couramment utilisée en construction métallique est la nuance d'acier qui est définie par sa limite d'élasticité  $f_y$ . (Tableau I.1).

| SIA 161 (1989) | Nuance d'acier selon EN(1992) | Limite d'élasticité $f_y$ | Allongement de rupture $\epsilon_0$ % |
|----------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Fe E 235       | S235                          | 235                       | 26                                    |
| Fe E 275       | S275                          | 275                       | 22                                    |
| Fe E 355       | S355                          | 355                       | 22                                    |

Tableau I.1. Caractéristique des principaux aciers de construction [7].

### I.1.6.2. ACIER DE CONSTRUCTION :

Dans les groupes des aciers de construction, on trouve les aciers au carbone et les aciers alliés, destinés à la fabrication des éléments de machines, utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. La teneur en carbone dans ce groupe d'aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6 %.

Un acier de construction doit posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une pénétration de trempée élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempée.

Il existe des centaines de nuances d'aciers de construction. Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin (acides et basiques), dans des fours électriques ouverts et dans des convertisseurs à soufflage supérieur [8].

### I.1.6.3. LE MATÉRIAU ÉTUDIÉ S355 :

Dans le cadre de cette étude, Le matériau a été étudié : un acier de construction S355

**L'acier S355 :** Le matériau utilisé est un acier de construction classique. Sa dénomination suivant la normalisation européenne est S355, suivant la normalisation américaine A 572 Gr et suivant la normalisation canadienne : Gr. 350. La composition chimique de l'acier S355 est présentée dans le *Tableau I.2*. Selon la norme EN 10248-1:1995 et les normes internationales comparables [9].

### I.1.6.4.COMPOSITION CHIMIQUE ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET THERMOPHYSIQUES :

#### A/Composition chimique :

La composition chimique indiquée par le fournisseur de ce matériau est résumée dans le tableau suivant :

| 355 | C     | Mn  | Si    | P    | S     | N    |
|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|
|     | 0.076 | 1.1 | <0.03 | 0.01 | 0.004 | 0.05 |

Tableau I.2. Composition chimique de l'acier S355 (% massique) [9].

#### B/Caractéristiques mécaniques :

Sont les suivantes :

- Limite d'élasticité maximale ReH: 355 N/mm<sup>2</sup>,
- Allongement minimal L0 : 22 %.
- Coefficient de poisson  $\nu$  : 0.3
- $\sigma_{0.2}$ :349N/mm<sup>2</sup>.
- $\sigma_u$ : 510N/mm<sup>2</sup>[9].

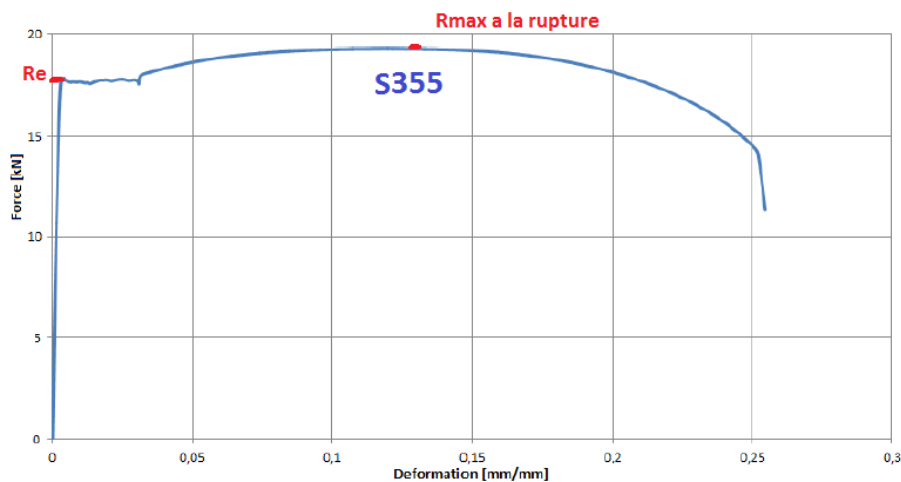


Figure I.18. Courbe de traction de l'acier S355 [10].

**C/ Caractéristiques thermo physiques :**

Ce sont les suivantes :

- Température du solidus  $T_s$ : 1440 °C.
- Température du liquidés  $T_l$  : 1505 °C.
- Température de fusion  $T_f$ : 1472,5 °C.
- Température d'évaporation  $T_{evap}$ : 2750 °C.
- Enthalpie de fusion  $L_f$ : 270 000 J.kg-1.
- Enthalpie d'évaporation  $L_{evap}$ : 6 595 000 J.kg-1.
- Emissivité thermique : 0.5 [9].

**D/ Leurs propriétés principales :**

Les principales propriétés de l'acier de construction sont les suivantes :

- **Soudabilité** : Les aciers de construction sont soudables par tous les procédés de soudage classiques compte tenu de leur bas niveau de carbone équivalent.
- **Découpage** : Les aciers de construction sont par achevables par tous les procédés de découpe mécanique, laser, plasma haute définition. L'oxycoupage à basse vitesse est déconseillé il existe un risque de dimensionnement et pertes de caractéristiques) [11].

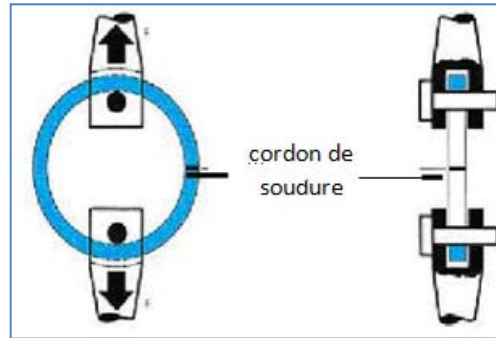
**I.1.7.LES ESSAIS DESTRUCTIFS :**

Les essais mécaniques ont pour but le contrôle des assemblages du point de vue des caractéristiques mécaniques dans les différentes zones de l'assemblage. Les essais sont conduits dans le respect des normes relatives et sont complétés par les examens macrographiques pour la pénétration et micrographiques pour l'étude des transformations structurales dans la ZF et la ZAT.

**I.1.7.1. Essai de traction sur bague :**

L'essai de traction sur bague est réalisé sur des tubes d'un diamètre extérieur de plus de 146mm ou d'un diamètre intérieur de plus de 100mm et d'une épaisseur de paroi de 40mm au maximum. Cet essai permet, outre la mise en évidence des défauts de surface et l'évaluation de la déformabilité, une estimation de l'aspect de la cassure. Pour les tubes soudés, le cordon

de soudure doit être décalé de  $90^\circ$  par rapport au sens de traction (Fig.I.18). Pour sa réalisation, on glisse des sections de tubes sur deux boulons de traction qui sont maintenus en travers par rapport à l'axe de la machine de contrôle par un dispositif de serrage. Les sections de tube sont écartées jusqu'à rupture [2].



*Figure. I.19 Traction transversale (traction sur bague) [2].*

### I.1.7.2. Essais d'aplatissement :

La présente norme NF EN 10233 (février 1994) A49-853 spécifie une méthode de détermination de l'aptitude à la déformation plastique par aplatissement de tubes métalliques de section circulaire ; elle peut également révéler les défauts des tubes. Cette norme est applicable aux tubes de diamètre extérieur inférieur ou égal à 600 mm et d'épaisseur ne dépassant pas les 15% du diamètre extérieur. L'aplatissement d'une éprouvette (entre les plateaux d'une machine), prélevée à l'extrémité d'un tube ou découpée dans un tube dans le sens perpendiculaire à l'axe longitudinal de ce tube Figure I.20, se poursuit jusqu'à ce que la distance entre les plateaux, mesurée sous charge dans la direction de l'aplatissement atteigne la valeur spécifiée dans la norme de produit concernée.; par contre dans le cas d'aplatissement dit à bloc les surfaces intérieures de l'éprouvette doivent venir en contact l'une avec l'autre sur au moins la moitié de la largeur  $b$  de l'éprouvette aplatie, cet essai a pour but de détecter les défauts dans le cordon de soudure qui se trouve sous forme de fissure, pique [12].

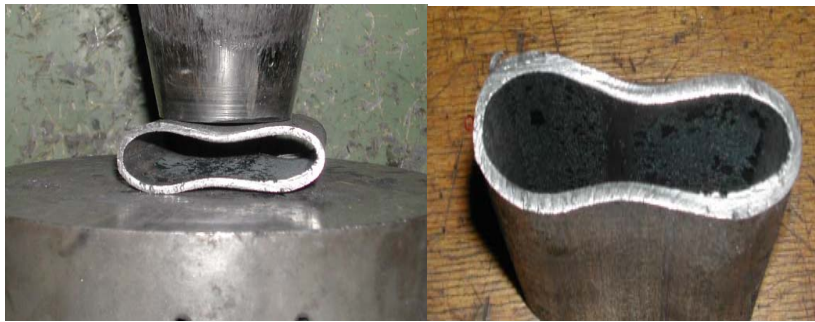


Figure I.20. Tube aplatie Machine de l'aplatissement [12].

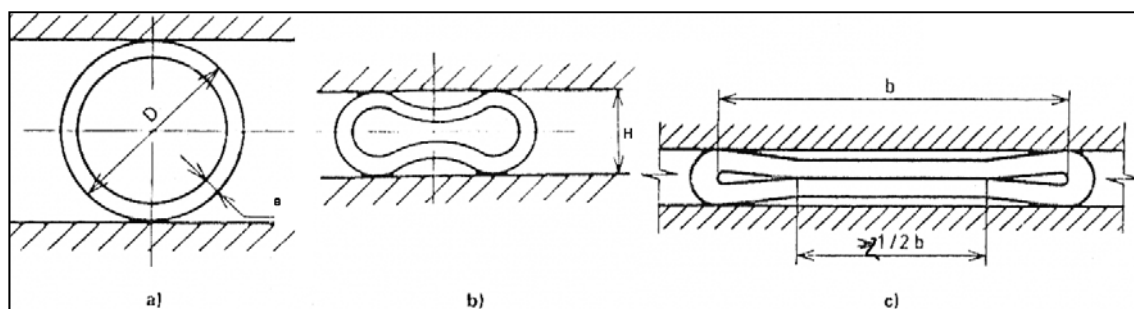


Figure I.21. L'essai d'aplatissement [12].

L'aplatissement est conduit jusqu'à ce que la distance  $H$  (distance entre plateaux, mesurée sous charge), atteigne la valeur limite supérieure calculée par la formule suivante :

$$H = \left[ \frac{1+K}{K+\frac{T}{D}} \right] \cdot T \quad (I.3)$$

**H** : hauteur qu'il ne faut pas dépasser pendant l'essai d'aplatissement.

**T** : épaisseur de tube.

**D** : diamètre extérieur de tube.

**K** : constante en fonction des matériaux [12].

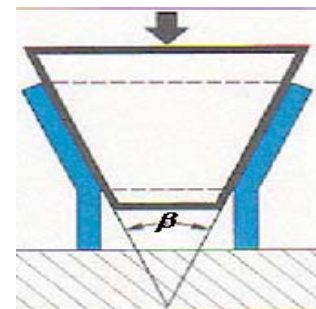
### I.1.7.3. Essais d'évasements :

La présente norme européenne EN 10234(octobre 1993) spécifie une méthode de détermination de l'aptitude à la déformation plastique par évasement de tubes métalliques de section circulaire elle est applicable aux tubes de diamètre extérieur au plus égal à 150mm (100mm pour les métaux légers) et d'épaisseur de paroi ne dépassant pas 10 mm.

L'évasement à l'aide d'un mandrin tronconique de l'extrémité d'une éprouvette découpée dans un tube, se poursuit, jusqu'à ce que le diamètre extérieur maximal du tube ainsi évasé, atteigne la valeur spécifiée dans la norme de produit concerné [12].



*Figure I.22. Tube évasé et Machine d'évasement [12].*



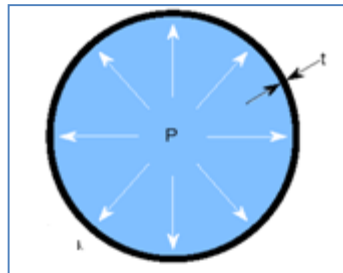
*Figure I.23. Principe d'évasement [2].*

### I.1.7.4. Essai de pression interne :

L'essai de pression interne est réalisé en fonction du secteur d'application des tubes, soit en tant que test d'étanchéité, soit en tant que test de résistance (éclatement). Les tubes destinés à la construction de centrales thermiques ou de chaudières et appareils de pression sont toujours contrôlés au niveau de l'étanchéité à une Pression de test constante de 50 ou 80bar. En raison du développement continu des méthodes de contrôle électromagnétique non

destructives, ce test d'étanchéité par pression interne est de plus en plus supplanté par les systèmes de contrôle électromagnétique pour prouver l'étanchéité des tubes *figure I.24*.

Si, suite à un accord spécial, un essai de résistance est réalisé, la pression de contrôle est déterminée de sorte qu'apparaisse dans le tube une tension circonférentielle proche de la limite élastique (DIN 2413) [2].



*Figure I.24.* Essai de pression interne [2].

Pour les tubes d'alimentation en énergie des réseaux interurbains, le contrôle de résistance par pression interne est obligatoire. Ce contrôle est effectué en général avec de l'eau. La pression de test est maintenue au moins pendant 5 secondes lors de l'essai d'étanchéité et au moins pendant 10 secondes lors de l'essai de résistance [2].

#### **I.1.7.5. Essai de corrosion :**

Ces essais sont généralement réalisés sur des éprouvettes avant soudage pour déterminer la meilleure méthode à utiliser pour obtenir des joints résistants en service à des milieux corrosif [2].

#### **I.1.8. CONTROLESNON- DESTRUCTIFS :**

Les contrôles non destructifs sont des techniques et des procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Parmi lesquels on peut citer :

- le ressuage.
- le contrôle radiographique ou gamma graphique.
- la magnétoscopie.
- visuelle [13].

Le premier permet de déceler les défauts apparents ou débouchant (exemple les caniveaux, les fissures, les soufflures, etc.). Les deux autres permettent de visualiser les défauts intérieurs (exemple : les soufflures gazeuses, les inclusions les fissurations internes, le collage entre les passe, le manque de pénétration, etc.). Ces opérations de contrôle sont effectuées par des personnels qualifiés ayant les compétences nécessaires pour interpréter les défauts relevés et leur donner un niveau d'acceptation selon les normes imposées [14].

La méthode la plus utilisée sur les chantiers de pose de canalisation est le contrôle par radiographie ou gammagraphie.

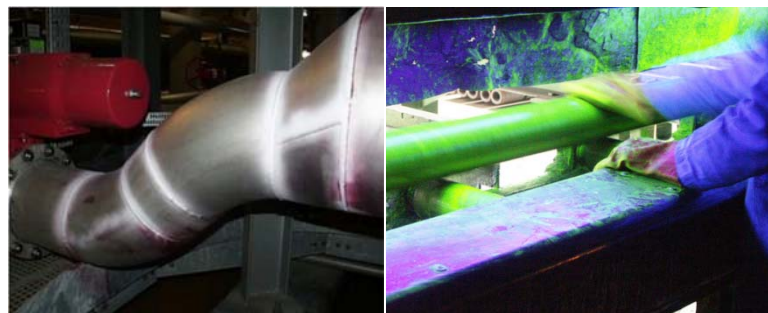
#### I.1.8.1. Visuels :

Ce contrôle s'opère essentiellement par le soudeur lui-même avec une torche ou bien avec une came, l'un de ces avantages : Simplicité, Coût bas [15].

#### I.1.8.2. Par ressuage :

Le ressuage consiste à badigeonner la soudure et son environnement d'un liquide très peu volatil : «le rouge d'organale ».

La grande fluidité de ce produit lui permet de pénétrer les micro fissures débouchâtes, après un essuyage minutieux, la zone est recouverte de talc en suspension dans un aérosol, les résidus de rouge d'organale présents dans les fissures, apparaissent sous la forme d'auréoles rouges [14].



*Figure I.25. Contrôle de soudures par ressuage.*

Son objectif est de détecter des défauts débouchant sur structures métalliques ou composites. et discontinuités matière ouvertes, débouchant à la surface de la pièce examinée [15].

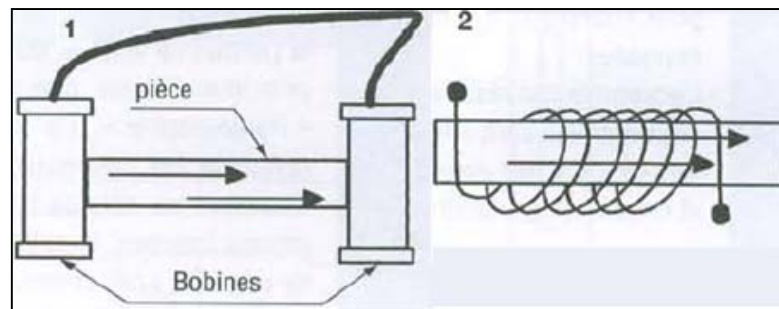
### I.1.8.3. Magnétoscopie

La magnétoscopie consiste à enduire une pièce d'une encre chargée en poudre de fer et à créer un champ magnétique perpendiculaire au défaut probable [14]. Si la pièce (ferromagnétique) est homogène, la poudre de fer restera répartie uniformément.

A l'endroit d'un défaut, les lignes d'induction étant déviées de fer, que ce défaut soit débouchant ou non.

- Un électro-aimant classique.
- Une bobine d'induction créant un courant de Foucault.

Cette technique a plusieurs avantages comme la Visualisation des défauts par produits indicateurs, soient visibles en lumière du jour (colorés), soit en lumière UV-A (fluorescents), les Appareils mobiles ou fixes et la rapidité, mais dans l'autre côté elle a des limitations on cite : Ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques, Sensible à l'orientation des défauts, Influence de l'opérateur, Automatisation Nécessité d'un nettoyage de la surface avant et après examen aussi Obligation de procéder à une désaimantation de la pièce après examen et met en œuvre des produits nocifs, inflammables et volatils [15].



*Figure I.26. Contrôle par magnétoscopie [14].*

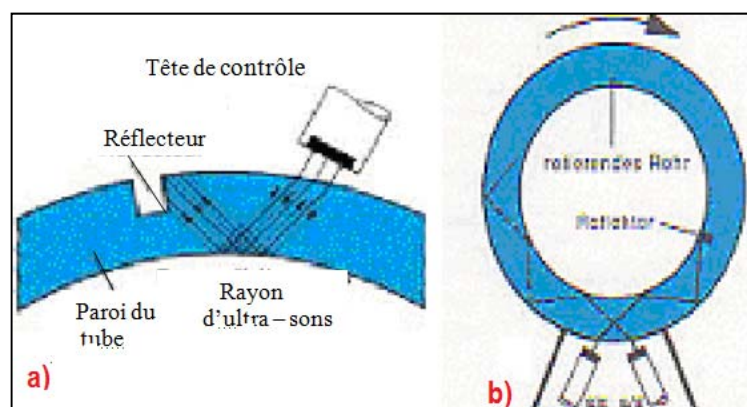
### I.1.8.4. Ultrason :

Pour les tôles, il est habituel d'effectuer, dès la sortie du laminoir, un contrôle aux ultrasons de la surface et des bords, le contrôle de la matière en feuillards n'est le plus souvent réalisé que sur le tube fini soudé. Il est souvent judicieux pour les gros tubes à soudure longitudinale, de réaliser en supplément, un contrôle des arêtes des tôles pendant le contrôle des cordons de soudure [2].

Le contrôle non destructif sur les tubes soudés est effectué pour l'essentiel sur le cordon de soudure dans le sens longitudinal et transversal. Le contrôle interne et la surveillance du procédé de soudure ont lieu.

Un émetteur émet un faisceau acoustique, habituellement à des fréquences de 2 à 4 MHz, qui, dans la plupart du temps avec solution d'eau, est projeté sur l'éprouvette. Les parties non homogènes de l'éprouvette, reflètent une partie de l'énergie acoustique lorsqu'elles sont touchées par le rayon acoustique [2].

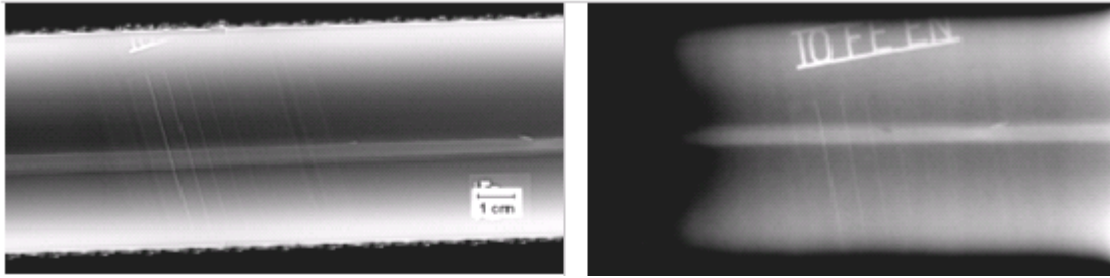
Une partie du son réfléchi est de nouveau réceptionnée et elle est affichée. Comme, l'émission et la réception des sons sont des processus physiquement réversibles, on peut se contenter de travailler dans de nombreux cas, avec une seule tête de contrôle. Celle-ci fonctionne alors alternativement comme émetteur ou comme récepteur. Cette méthode de travail est présentée en Figure I.27.a.



*Figure I.27.a) Contrôle aux ultrasons et b) Contrôle aux ultrasons avec têtes de contrôle fixe et tube rotatif [2].*

#### **I.1.8.5. Rayons X et gamma :**

Depuis des décennies, la méthode du contrôle non destructif par rayons X n'a pas vraiment évolué et est restée basée sur le film radiographique. Malheureusement, cette technologie ne permet pas de s'adapter aux nouvelles contraintes de l'industrie. D'où l'importance de développer une nouvelle méthode de détection dont les principales propriétés seraient une image digitale, dynamique, à haute résolution et à contraste élevé. Les images digitales ainsi obtenues peuvent être analysées par ordinateur, transférées sur les réseaux informatiques et sauvegardées sur des supports de taille réduite. Les images dynamiques permettent de disposer des résultats en temps réel et à une cadence correspondante à celle des unités de production. Enfin, les images à haute résolution et à contraste élevé permettent de détecter avec une très grande précision les défauts dans les échantillons analysés, et d'assurer un contrôle qualité maximum [2].



**Figure I.28.** Radiographie d'une soudure longitudinale sur un tube en acier[2].

Le contrôle par radiographie est une méthode permettant de détecter les discontinuités à l'externe ou à l'interne en utilisant des rayons X ou de rayons gamma qui pénètrent une partie de consulter tous les discontinuités qui produisent une image permanente sur un film. En raison de différence de densité et les différences dans les caractéristiques d'absorption dues à la variation de la composition, les différentes portions d'un objet d'absorber des quantités différentes de la radiation pénétrante. En général, la radiographie permet de détecter uniquement les éléments qui ont une épaisseur appréciable dans une direction parallèle au faisceau de rayonnement. Ce contrôle est coûteux et dangereux du fait dans les mesures de précaution particulières qui doivent être prises lors de la saisie ou d'approcher un domaine radiographique [2].

## I.2. STRUCTURE TUBULAIRE

### I.2.1. Introduction

Dans ces dernières décennies, les assemblages tubulaires soudés occupent une part considérable dans plusieurs domaines de construction métallique. On cite, entre autres, les supports de plateformes offshore, les pipelines, les tripodes de transport d'énergie électrique, les mâts des réseaux de télécommunication, etc... Ces structures sont constituées généralement d'un grand nombre d'éléments structuraux tubulaires assemblés entre eux par soudage en constituant des jonctions tubulaires soudées de formes géométriques, parfois, très complexes. Cette complexité géométrique peut provoquer des contraintes locales de grandes amplitudes pouvant endommager toute la structure soit par phénomène de fatigue soit par plastification en commençant par le point chaud[16]. Pour satisfaire les besoins énergétiques, plus de deux cents plateformes offshore ont été installées en Mer du Nord depuis une trentaine d'années. Ces structures, nécessaires à l'exploitation des réserves d'hydrocarbures en milieu marin (figure I .29), sont constituées de tubes en raison du bon rapport résistance/poids, d'une meilleure tenue au flambage et de la bonne résistance aux courants et marées de ces éléments. Les éléments tubulaires de ces Structures sont soudés entre eux (figure I .30) constituant ainsi les différentes formes des Jonctions tubulaires. Les intersections complexes de ces jonctions représentent des discontinuités structurales conduisant à de fortes concentrations de contraintes au voisinage des cordons de soudure. Ces concentrations sont caractérisées par le facteur de concentration de contrainte, noté  $K_t$  ou  $SCF$  (Stress Concentration Factor)[17].



*Figure I .29: Plateforme de forage  
CFEM T 2005 Autoélévatrice*



*Figure I .30: Soudage des éléments tubulaires  
d'une plate forme offshore*

## I.2.2. Classification des structures tubulaires

Les structures tubulaires sont classées généralement en cinq groupes principaux :

- 1- structures soudées simples ;
- 2- structures multi plans ;
- 3- structures renforcées ;
- 4- structures fondues ;
- 5- structures composites [17].

### I.2.2.1. Structures soudées simples

Ces jonctions sont habituellement formées par soudage de l'extrémité d'une ou de plusieurs entretoises sur le manchon (figure 1-2); les axes de ces entretoises sont tous situés dans un même plan parallèle à une génératrice du manchon.

Selon l'orientation et le nombre des entretoises, on classe ces jonctions en T, Y, K, X, DT, DY, DK, TY, XDT, DYDT, KT et DKDT, comme il est indiqué dans la figure I .31 [18].

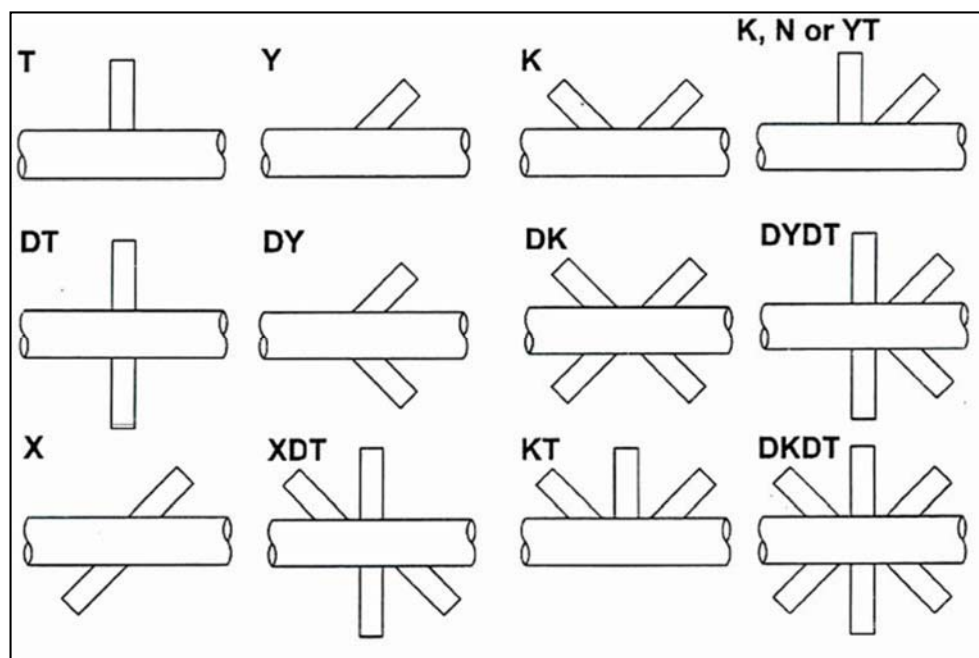


Figure I .31: Formes des structures soudées simples

### I.2.2.1.1. Nœuds de types T et Y

Ces nœuds comportent une seule entretoise perpendiculaire à la membrure, ou inclinée

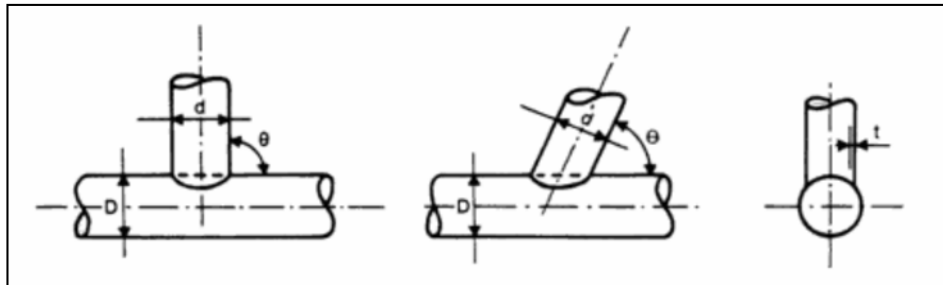


Figure I .32: Nœuds en T et en Y

Il existe une limite inférieure pour l'angle  $\theta$  [18].

### I.2.2.1.2. Nœuds en X

Les nœuds en X sont constitués de deux entretoises coaxiales de part et d'autre de la membrure. [18]

Cas particulier  $\theta = 90^\circ$

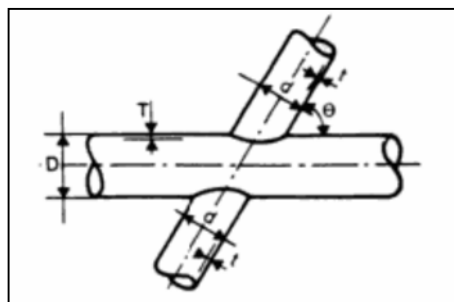


Figure I .33: nœuds en X

### I.2.2.1.3. Nœuds en N, K et KT

Ces nœuds comportent deux (ou trois) entretoises soudées sur la membrure [18].

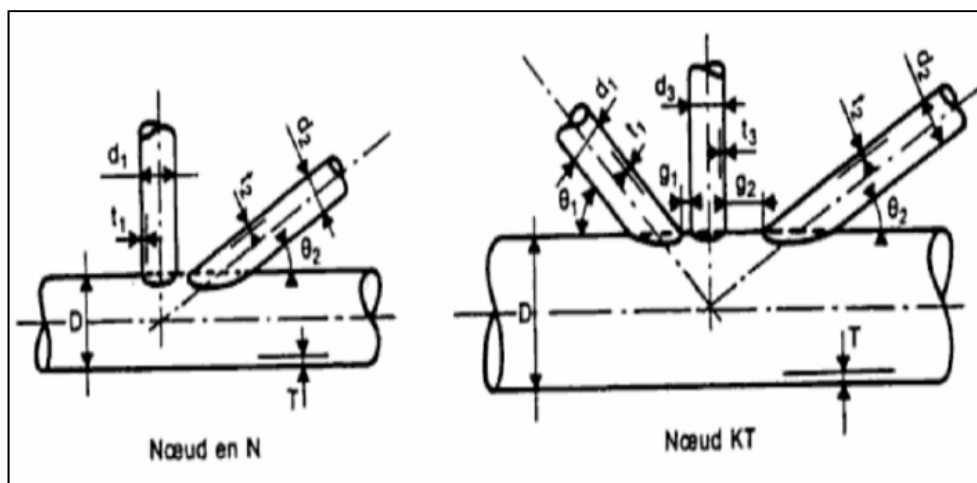


Figure I .34: Nœuds en N, K et KT

## a) Excentrement

Trois cas peuvent se présenter selon les schémas ci-dessous [18].

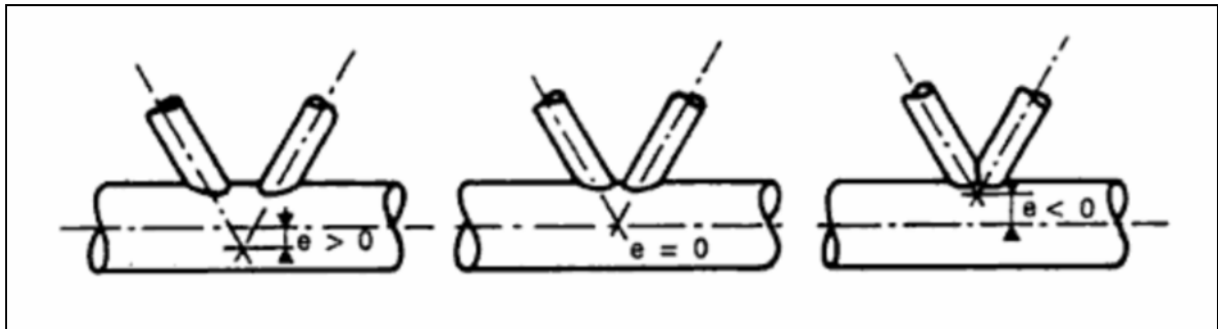


Figure I.35: Excentrement

Le nœud à recouvrement est considéré comme un nœud complexe. D'une manière générale, la règle de la convergence des lignes d'épure est à respecter. Toutefois, pour des raisons constructives, cette convergence n'est pas toujours possible, ni préférable.

## b) Espacement, recouvrement

On dit qu'il y a recouvrement lorsque deux entretoises se rencontrent avant d'accoster la membrure; dans le cas contraire, il y a espacement [18].

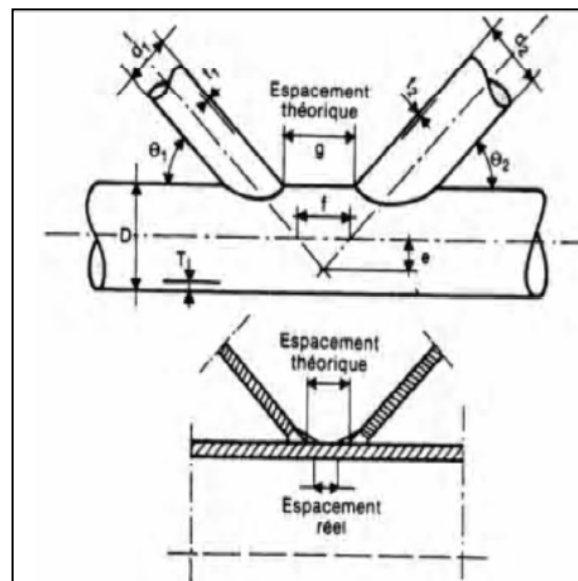


Figure I.36: Espacement, recouvrement

- Les nœuds en K avec recouvrement sont classés parmi les nœuds complexes, du fait de la difficulté particulière d'évaluation de la valeur de la concentration de contrainte ainsi que de la position de celle-ci.

- Quelque soit le signe de l'excentrement, la distance entre axes, mesurée sur l'axe de la membrure vaut:

$$f = e(1/\operatorname{tg}\theta_1 + 1/\operatorname{tg}\theta_2) \quad (\text{I.4})$$

Les nœuds avec recouvrement sont souvent utilisés dans le but de

- respecter les contraintes géométriques imposées au nœud (autres piquages, etc.) ;
- profiter du fait que la résistance statique d'un nœud avec recouvrement est plus grande que celle d'un nœud équivalent sans recouvrement ;
- réduire l'excentrement des charges appliquées dans les entretoises;
- réduire les concentrations de contraintes dans le nœud

### c) Valeurs usuelles des paramètres géométriques

Le tableau I.3 donne les valeurs des paramètres géométriques que l'on rencontre communément pour les nœuds non raidis d'ouvrages pétroliers en mer. Il est conseillé d'adopter des valeurs qui tombent dans la gamme des valeurs types

| Paramètres      | Valeurs types    | Valeurs Min. | Valeurs Max. |
|-----------------|------------------|--------------|--------------|
| $\beta = d/D$   | 0.4 à 0.8        | 0.2          | 1.0          |
| $\gamma = D/2T$ | 12 à 20          | 10           | 30           |
| $\tau = t/T$    | 0.3 à 0.7        | 0.2          | 1.0          |
| $\theta^{(*)}$  | 40 à 90          | 30           | 90           |
| $\zeta = g/D$   | Négative à + 0.5 | Négative     | 1.0          |

*Tableau I.3. Valeurs limites des paramètres géométriques*

Pour le cas d'un nœud K, N ou KT, l'inclinaison entre deux membrures doit être

- supérieure à 15° quand il s'agit de deux entretoises,
- supérieure à 30° quand il s'agit d'une entretoise et de la membrure.

#### I.2.2.1.4. Nœuds de géométrie complexe

En ce qui concerne les nœuds de géométrie complexe, il n'existe pas de méthode de calcul simple permettant, comme dans les nœuds de géométrie simple, de déterminer les coefficients de concentration de contraintes ou la résistance statique.

Dans le cas des nœuds de géométrie complexe, les seules méthodes qui permettent d'analyser l'état local des contraintes sont

- les méthodes numériques : méthode des éléments finis, par exemple;
- les méthodes expérimentales :
  - Mesures sur modèles acryliques ou en résine époxyde (soit par des techniques d'extensomètre, soit par des techniques de photoélasticimétrie),

➤ Mesures sur modèles en acier; les déformations sont étudiées généralement par des techniques d'extensomètre.

On distingue dans les nœuds de géométrie complexe, trois grandes catégories :

- les nœuds à recouvrement,
- les nœuds pour lesquels il existe plusieurs piquages de tubes sur une même membrure, situés dans un ou plusieurs plans,
- les nœuds avec raidisseurs.

Pour les nœuds de géométrie simple et pour certains cas d'application des charges, on est en mesure de calculer, à l'aide de formules paramétriques simples, le coefficient de concentration de contrainte; de plus, la géométrie et le mode de sollicitation sont tels qu'il est possible de situer, avec une précision suffisante, la position du point chaud. Il n'en est généralement pas de même dans les nœuds de géométrie complexe. La remarque précédente est également valable pour l'évaluation de la résistance statique [18].

#### I.2.2.1.5. Nœuds avec recouvrement

On appelle nœud avec recouvrement un nœud pour lequel deux entretoises, au moins, se coupent avant d'accoster la membrure principale. Actuellement, il n'existe pas de formules paramétriques pour le calcul du coefficient de concentration de contrainte dans les nœuds en K avec recouvrement. La position du point chaud varie de façon considérable, selon l'entretoise sollicitée. En général, lorsque l'entretoise discontinue est chargée axialement, le point chaud apparaît au sommet du recouvrement ; lorsque l'entretoise continue est chargée axialement, le point chaud se trouve quelque part sur la zone de jonction membrure-entretoise, mais très rarement aux points de quartier ou d'arçon.[18].

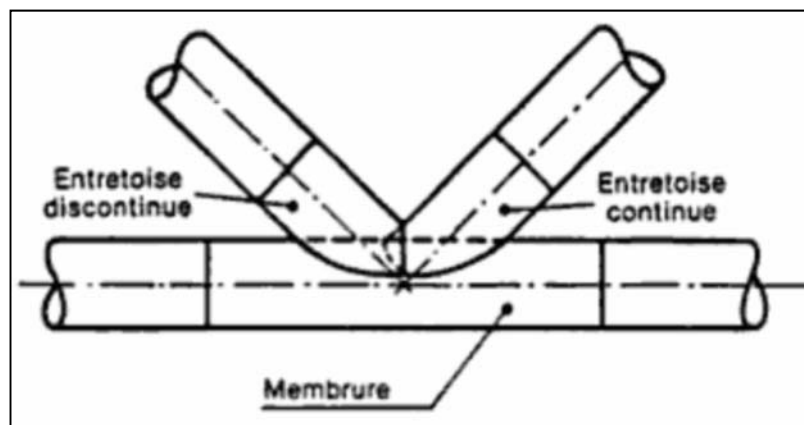
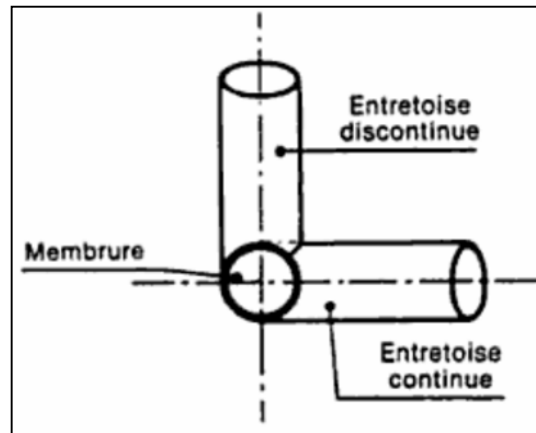


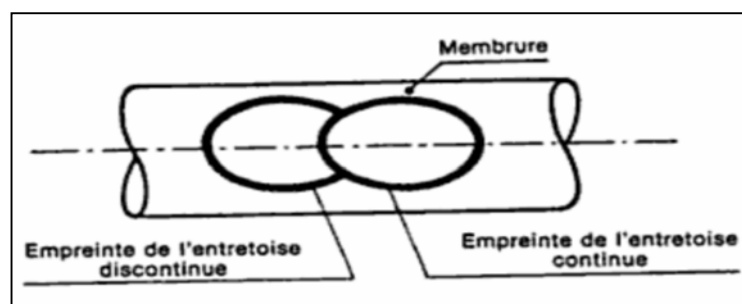
Figure I .37: Nœud avec recouvrement (entretoises et membrure dans un même plan)

Le recouvrement peut avoir lieu lorsque les entretoises et la membrure sont dans un même plan (fig. I.37), ou lorsque les entretoises et la membrure sont dans des plans différents (fig. I.38).



**Figure I .38:** Nœud avec recouvrement (entretoises et membrure dans des plans différents)

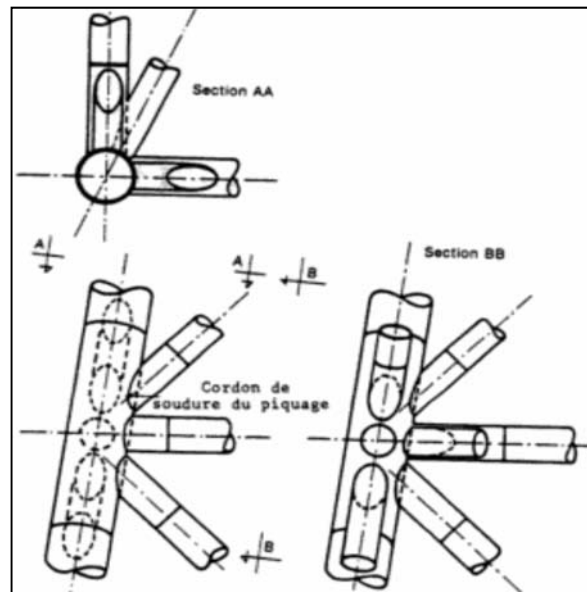
Le recouvrement permet que la section soudée, commune des entretoises qui se recouvrent, résiste à une partie de l'effort tranchant transmis par les entretoises. Ainsi, la section de la membrure n'a pas à résister à l'effort tranchant total ; les déformations dues à l'effort tranchant dans la paroi de la membrure sont ainsi limitées. Le recouvrement d'un tube sur l'autre améliore la rigidité de flexion de la paroi de la membrure. Ce raidissage local de la paroi de la membrure est dû à la présence d'une zone de liaison continue entretoises-membrure (fig. I.39). Les deux remarques précédentes montrent l'intérêt pratique de ce type de nœud (en K avec recouvrement) et expliquent les raisons pour lesquelles on y a constaté des concentrations de contraintes moins élevées que dans les nœuds en K sans recouvrement.



**Figure I .39:** Présence d'une zone de liaison continue entretoises- membrure

### I.2.2.1.6. Nœuds avec plusieurs piquages de tube.

Un exemple de tels nœuds est montré à la figure I.40 [18].



*Figure I .40: Nœuds avec plusieurs piquages de tubes*

Contrairement au cas des nœuds simples, la définition d'un coefficient de concentration de contrainte appliquée au cas des nœuds avec plusieurs piquages de tubes est ambiguë.

→ Cas d'une sollicitation simple (effort axial ou moments fléchissant)

A défaut d'autres définitions clairement précisées pour chaque cordon de soudure étudié en fatigue, attachant une entretoise à la membrure (piquage), on peut adopter par convention un coefficient de concentration de contrainte relatif à une sollicitation simple.

→ Cas de sollicitations complexes (présence simultanée d'un effort axial et de moments fléchissant)

Dans le cas de sollicitations complexes, on ne peut pas donner une définition du coefficient de concentration de contrainte.

La variation de contrainte de dimensionnement est alors évaluée à partir de la superposition des concentrations de contrainte relatives à chaque sollicitation simple s'exerçant sur l'entretoise assemblée au nœud par le cordon de soudure étudié [18].

### I.2.2.1.7. Nœuds avec raidisseurs

Les concentrations de contraintes sur certains nœuds sont parfois si importantes que cela nécessite une forte épaisseur des tubes afin d'obtenir la durée de vie requise. Compte tenu de problèmes liés aux fortes épaisseurs, beaucoup de bureaux d'études se sont orientés vers

l'utilisation du raidissage, qui permet soit de réduire l'épaisseur des tubes (en particulier la membrure).

L'idée qui conduit à raidir la paroi d'une membrure faisant partie d'un nœud d'assemblage de tubes, est de vouloir augmenter la rigidité à la flexion de cette paroi sous l'effet de l'action de poinçonnement de l'entretoise (fig. I.40).

Il existe généralement deux types de raidissage, soit par raidisseurs annulaires (extérieurs ou intérieurs), soit par raidisseurs longitudinaux. L'efficacité d'un raidissage dépend :

— à la fois du type de chargement et de la position des raidisseurs, ainsi que du type de raidisseurs

— de l'inertie des raidisseurs et de leur nombre.

Les raidisseurs longitudinaux ont surtout pour effet de diminuer la valeur de la concentration des contraintes due à une sollicitation "simple" axiale ou de flexion dans le plan ; et les raidisseurs annulaires celui de diminuer la valeur de la concentration de contraintes due à une sollicitation simple axiale ou de flexion hors du plan. Cependant, elle rend plus difficile la localisation a priori du point chaud.

De préférence, on maintiendra la continuité des raidisseurs annulaires; les raidisseurs longitudinaux seront alors discontinus. Les raidisseurs longitudinaux seront soudés sur les raidisseurs annulaires de façon à rétablir la continuité. Le raidisseur annulaire peut être constitué de plusieurs tronçons comme indiqué sur la section AA de la figure I.41.

L'usage de raidisseurs, par les cordons de soudure qu'ils comportent, crée inévitablement de nouvelles zones de concentration de contraintes [18].

#### **I.2.2.1.8. Nœuds avec raidisseurs**

Les concentrations de contraintes sur certains nœuds sont parfois si importantes que cela nécessite une forte épaisseur des tubes afin d'obtenir la durée de vie requise. Compte tenu de problèmes liés au forte épaisseur, beaucoup de bureaux d'études se sont orientés vers l'utilisation du raidissage, qui permet soit de réduire l'épaisseur des tubes (en particulier la membrure).

L'idée qui conduit à raidir la paroi d'une membrure faisant partie d'un nœud d'assemblage de tubes, est de vouloir augmenter la rigidité à la flexion de cette paroi sous l'effet de l'action de poinçonnement de l'entretoise (figure. I.41).

Il existe généralement deux types de raidissage, soit par raidisseurs annulaires (extérieurs ou intérieurs), soit par raidisseurs longitudinaux

L'efficacité d'un raidissage dépend :

- ✓ à la fois du type de chargement et de la position des raidisseurs, ainsi que du type de raidisseurs
- ✓ de l'inertie des raidisseurs et de leur nombre.

Les raidisseurs longitudinaux ont surtout pour effet de diminuer la valeur de la concentration des contraintes due à une sollicitation "simple" axiale ou de flexion dans le plan ; et les raidisseurs annulaires celui de diminuer la valeur de la concentration de contraintes due à une sollicitation simple axiale ou de flexion hors du plan. Cependant, elle rend plus difficile la localisation a priori du point chaud. De préférence, on maintiendra la continuité des raidisseurs annulaires; les raidisseurs longitudinaux seront alors discontinus. Les raidisseurs longitudinaux seront soudés sur les raidisseurs annulaires de façon à rétablir la continuité. Le raidisseur annulaire peut être constitué de plusieurs tronçons comme indiqué sur la section AA de la figure I.41.

L'usage de raidisseurs, par les cordons de soudure qu'ils comportent, crée inévitablement de nouvelles zones de concentration de contraintes.

Si l'on n'y prend garde, l'amélioration réelle qu'ils apportent aux concentrations de contraintes des intersections de tubes peut être contrebalancée par les nouveaux risques qu'ils créent ainsi. Sauf cas particuliers qui nécessitent des études spéciales, les dispositions constructives faisant appel à un raidissage extérieur ne sont pas recommandées pour les ouvrages pétroliers en mer.

En construction tubulaire autre que marine, l'usage de tubes de faible diamètre interdit l'usage de raidisseurs intérieurs.

Le fait de raidir la membrure continue du nœud a permis d'accroître notablement la résistance au poinçonnement. Pour le mode de raidissage extérieur, les raidisseurs viennent également se fixer sur les entretoises. L'effort transmis à la membrure par les entretoises transite par l'intermédiaire des raidisseurs extérieurs et vient, de ce fait, créer des concentrations de contraintes localisées à la jonction raidisseur-entretoise [18].

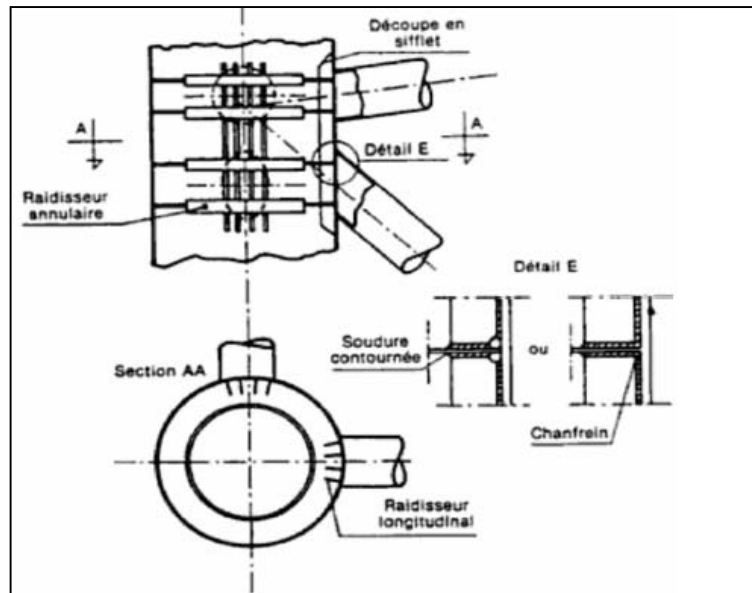


Figure I.41: Nœuds avec raidisseurs

- Zones critiques de concentrations de contraintes

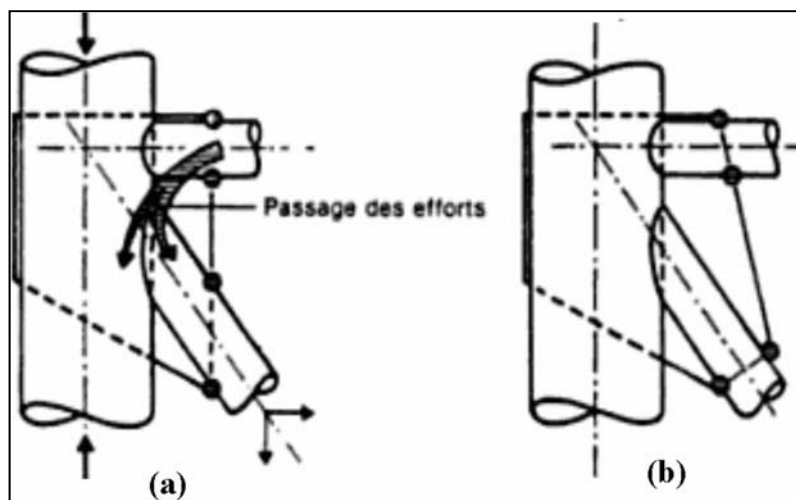


Figure I.42: Zones critiques de concentrations de contraintes

Pour ce mode de raidissage par l'extérieur, si l'on augmente de façon importante la résistance au poinçonnement, on n'améliore pas la résistance à la fatigue. On a même constaté que la résistance à la fatigue avait tendance à diminuer fortement, du fait de l'apparition prématurée de fissures de fatigue dans les zones critiques de concentrations de contraintes (fig. I.42).

Des essais expérimentaux ont montré la possibilité d'avoir des fissures de fatigue au niveau des cordons de soudure attachant ces raidisseurs. En règle générale, sur les structures fixes, les raidisseurs intérieurs sont impossibles à inspecter et à réparer sur une structure en service.

### I.2.2.1.9. Dispositions constructives générales des nœuds

Un certain nombre de conditions est lié à la géométrie et à la préparation des nœuds et cordons de soudures. En particulier, le profil de la soudure au voisinage des pieds des cordons de soudure. La durée de vie à la fatigue est en partie conditionnée par la forme locale réelle du congé de raccordement entre la soudure et la paroi, soit de la membrure, soit de l'entretoise. Une bonne réalisation de ce détail a pour effet d'augmenter la durée d'amorçage à la fissuration [18]. La résistance à la fatigue d'un nœud d'un ouvrage en mer est très fortement influencée par les conditions de préparation, de fabrication et de parachèvement des tubes à assembler d'une part, et de contrôle des cordons de soudure d'autre part.

Ce chapitre ne vise que la définition d'un certain nombre de conditions relatives :

- à la découpe des tubes et au chan freinage des bords,
- à l'accostage et au pointage des tubes,
- à la géométrie et aux dimensions du cordon de soudure.

Il existe d'autres conditions très importantes qui peuvent jouer un rôle non négligeable dans l'amélioration des conditions de réalisation des cordons de soudures, à savoir :

- le choix des nuances et qualités d'acier, associé au choix des procédés de soudage et des paramètres de soudage,
- la qualification des soudeurs,
- le contrôle de la qualité et l'inspection.

### I.2.2.1.10. Conditions géométriques dans la constitution d'un nœud

On notera que pour des raisons d'amélioration de la résistance statique et en fatigue d'un nœud, on est amené à augmenter l'épaisseur du manchon du nœud. Lorsqu'on aboutit ainsi à des épaisseurs importantes, on est conduit, pour éviter des problèmes de fabrication, à prendre pour le manchon un acier de limite d'élasticité plus grande, ce qui introduit une amélioration de la résistance statique uniquement.

a) Pour les nœuds en K avec recouvrement :

- ✓ Le dimensionnement du recouvrement (c'est-à-dire du cordon de soudure entre deux entretoises)

Sera tel, qu'il puisse résister au moins à 50 % de la composante perpendiculaire à l'axe de la membrure de l'effort axial  $N$  (fig. I.43) [18].

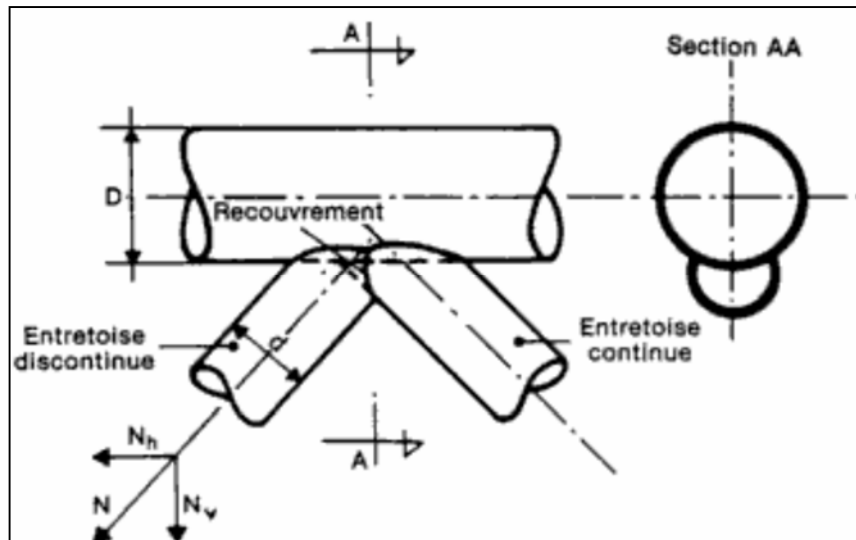


Figure I.43: dimensionnement du recouvrement

✓ L'entretoise la plus épaisse, ou la plus sollicitée, est soudée de façon continue sur ta membrure (c'est l'entretoise continue); en aucun cas, l'épaisseur de cette entretoise ne doit dépasser l'épaisseur de la membrure. Généralement, pour les ouvrages pétroliers en mer, les tubes ont le même diamètre extérieur.

### I.2.2.2. Structures multi plans

Dans les jonctions tubulaires multi plans, les entretroises sont soudées sur le manchon en plusieurs plans (généralement deux plans dont un parallèle et l'autre perpendiculaire à une génératrice du manchon) conduisant ainsi à des formes de jonctions plus complexes comme la jonction DT illustrée dans la figure I.44.

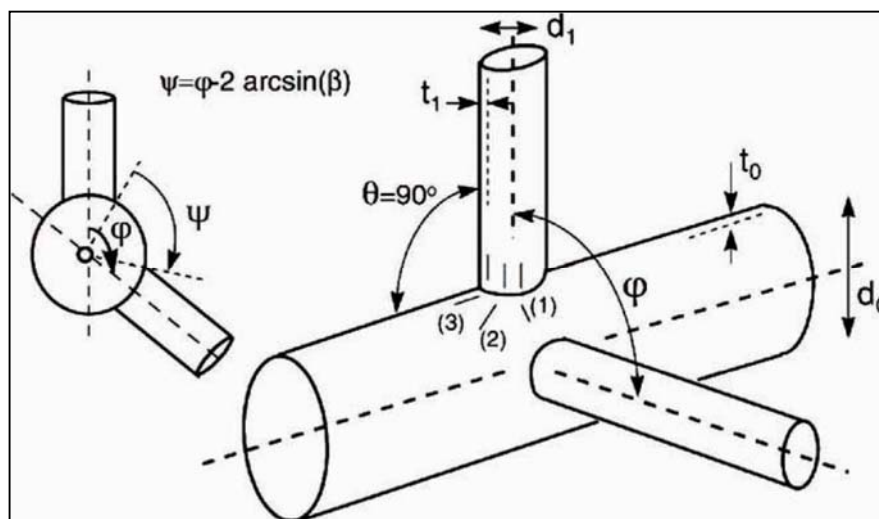
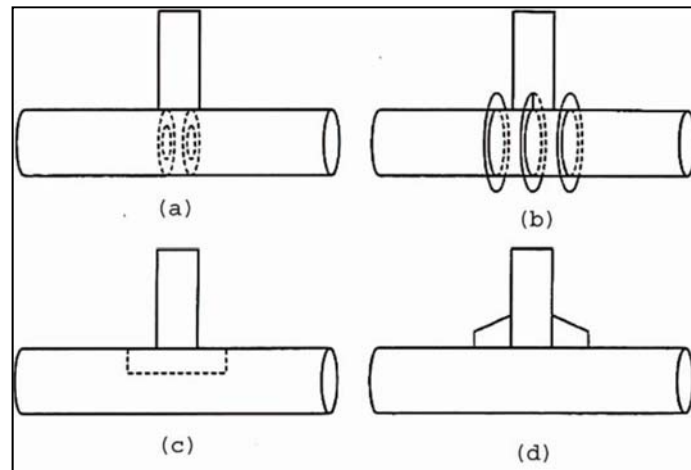


Figure I.44: structures multi plans

### I.2.2.3. Structures renforcées

Le manchon d'une jonction tubulaire peut être raidi intérieurement ou extérieurement en utilisant des anneaux, des diaphragmes, des plats ou des goussets. Les renforts augmentent la rigidité radiale du manchon. Le choix et la position des renforts sont habituellement déterminés en fonction de la charge prédominante. La figure I .44 présente des exemples de jonctions raidies.

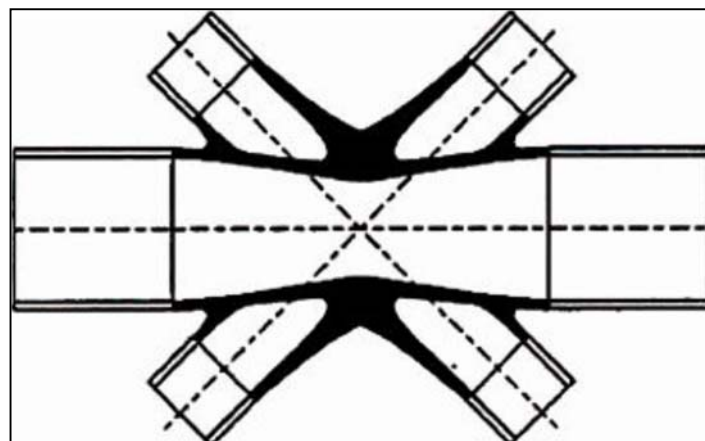


*Figure I .45: structures renforcées*

(a) par des anneaux intérieurs, (b) par des anneaux extérieurs, (c) par un plat et (d) par des goussets

### I.2.2.4. Structures fondues

Le coulage donne la possibilité d'avoir des composants intégrés et homogènes avec des contraintes résiduelles inférieures à celles des jonctions soudées. Un exemple de jonction coulée (ou fondue) est indiqué sur la figure I .46



*Figure I .46: structures fondue*

### I.2.2.5. Structures composites

Les jonctions composites sont des jonctions raidies en remplissant totalement ou partiellement le manchon d'une jonction tubulaire, comme le montre la figure I .47

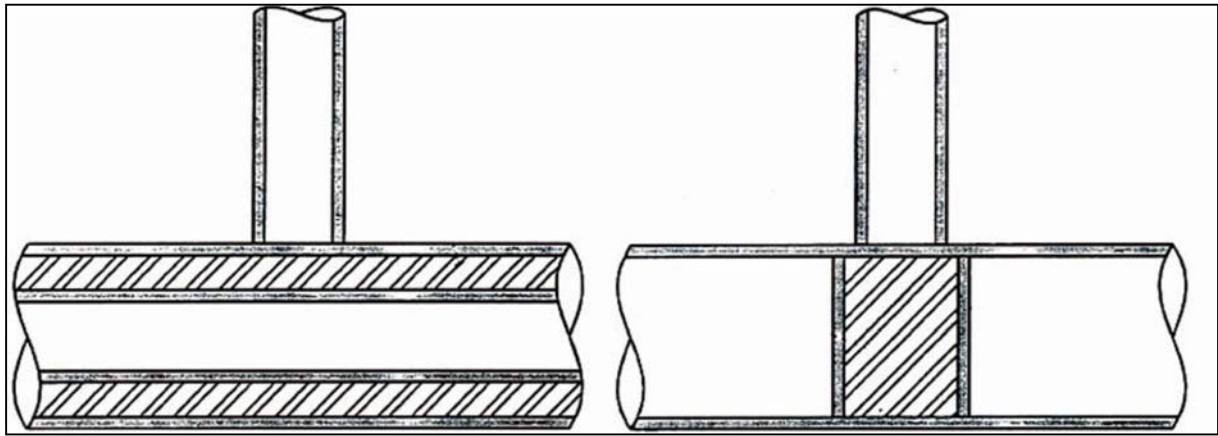


Figure I .47: structures composites

## I.2. 3.Les thèmes étudiés dans le domaine des jonctions tubulaires

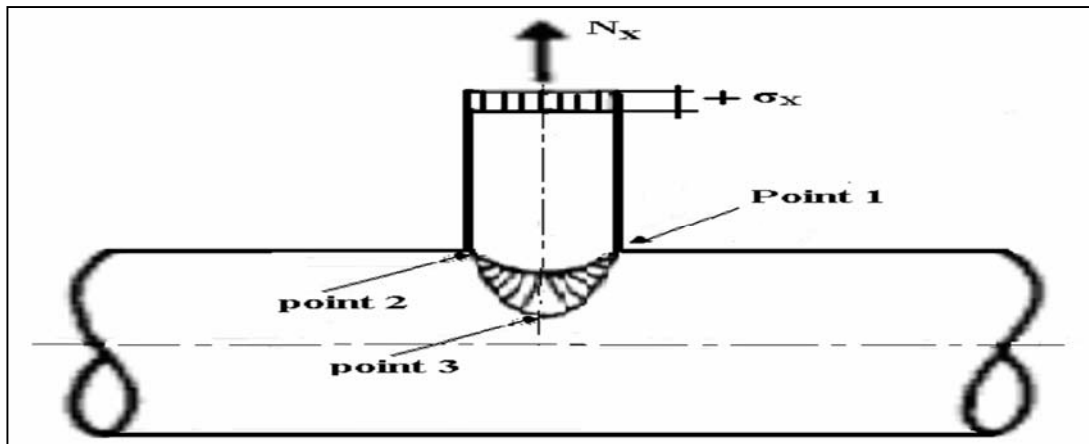
Plusieurs thèmes de recherches, relatifs aux jonctions tubulaires, ont été traités dans la littérature. Parmi ces thèmes, on peut citer : les analyses linéaires et non linéaires en 3D des contraintes et des déplacements ; les études statiques et dynamiques ; les facteurs de concentration de contraintes ; les caractéristiques des courbes « charge – déplacement » ; les contraintes aux points chauds ; l'influence du chargement sur le comportement des jonctions ; les analyses des charges de rupture ; les facteurs d'intensité de contrainte ; les jonctions tubulaires fissurées ; les endommagements par fatigue ; les contraintes résiduelles ; la détection des fissures à l'aide des contrôles non destructifs.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter quelques-uns de ces thèmes traités dans la littérature et relatifs aux jonctions tubulaires utilisées dans les structures offshore.

## I.2.4.Contraintes dans les jonctions tubulaires

### I.2.4.1.Mode de chargement

Le mode de chargement est très influent sur la résistance en fatigue d'une soudure. La comparaison de résultats obtenus soit en traction, soit en flexion, fait apparaître un effet du gradient de contrainte au voisinage du pied du cordon, qui se traduit par des durées de vie différentes en fatigue avec la même amplitude de contrainte appliquée. Similairement, la position des appuis par rapport au point d'application de la force est un facteur qui influence la nature des contraintes en proximité du cordon. Ces contraintes peuvent être de traction ou de flexion ou bi axiale dans les zones de concentration



**Figure I .48:** définitions des points de rupture en fatigue dans un assemblage en T soumis à une traction et une flexion

La vérification de la résistance statique des assemblages de tubes soudés suppose :

- la détermination ou la prévision des sollicitations maximales qui s'exerceront sur un assemblage donné durant la vie de la structure;
- l'existence de formules de résistance statique ultime qui permettent de vérifier que ces sollicitations maximales ne provoqueront pas la ruine de l'assemblage.

La détermination ou la prévision des sollicitations maximales nécessite :

- La prise en compte de toutes les catégories de chargements (poids propre, charge d'exploitation, charges dues à l'environnement, etc.);
- La définition des cas de charges qui feront l'objet de la vérification. Peuvent concerner des conditions normales ou des conditions particulières dues aux valeurs extrêmes que peuvent prendre les différentes variables climatiques ou océanographiques. Ils concernent aussi les conditions temporaires rencontrées durant les premières phases de la vie de la structure (fabrication, lancement, remorquage).
- Un modèle de calcul des sollicitations à partir des actions.

Suivant un repère lié à l'entretoise, les sollicitations nominales prises en compte dans le calcul final de la contrainte de dimensionnement et qui vont être appliquées sur chaque entretoise sont alors :

- ✓ l'effort normal  $N_x$ (traction),
- ✓ le moment fléchissant  $M_y$ : flexion dans le plan (Fdp),
- ✓ le moment fléchissant  $M_z$ : flexion hors du plan (fhdp).

Les autres sollicitations  $M_x$ ,  $N_y$  et  $N_z$  sont négligées.

On calcul pour chacune des sollicitations retenues ( $N_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$ ), les contraintes nominales rapportées à la section du tube, compte tenu du module d'inertie élastique du tube et de sa section, soit  $\sigma_{FY}$ ,  $\sigma_{FZ}$  et  $\sigma_{Ax}$  [18].

### 1.2.4.2. Contrainte locale

La valeur de la contrainte locale ( $\sigma_L$ ) au pied du cordon de soudure dépend de la forme du cordon de soudure, du profil du raccordement entre ce cordon et la paroi extérieure soit de la membrure soit de l'entretoise et, éventuellement, d'effets très locaux d'entaille. Cette contrainte locale est très difficile à déterminer soit expérimentalement, soit par le calcul ; de plus cette contrainte est de par sa nature même une grandeur aléatoire. Aussi, a-t-on écarté l'idée de vouloir définir la contrainte de dimensionnement par cette contrainte locale.

Il est évident que la valeur de cette contrainte locale conditionne dans une certaine mesure la durée de vie en fatigue du nœud. Cette contrainte locale influe en particulier sur la durée d'amorçage.

Etant donné le caractère aléatoire de l'influence des effets locaux sur la valeur de la contrainte locale, on adopte comme contrainte de dimensionnement  $\sigma_G$  qui ne dépend que de la géométrie du nœud et de son chargement ; c'est cette contrainte qui a servi de base l'établissement des courbes S-N [18].

#### 1.2.4.2.1. Définition de la contrainte de dimensionnement et du coefficient de Concentration de contrainte pour un chargement donné

Pour un chargement donné, la contrainte de dimensionnement ( $\sigma_G$ ) correspond à la contrainte maximale au pied du cordon de soudure, soit du côté de la membrure soit du côté de l'entretoise. Elle ne prend en compte que l'effet de la géométrie globale du nœud.

$$\sigma_G = \sigma_{\max} \quad (I.5)$$

$\sigma_{\max}$  Correspond à la contrainte principale maximale, calculée au sens global, relative à une jonction membrure-entretoise.

Dans le cas d'une sollicitation simple, cette contrainte de dimensionnement ( $\sigma_G$ ) est le produit de la contrainte nominale ( $\sigma_{nom}$ ), obtenue selon la résistance des matériaux classique par le coefficient (facteur) de concentration de contrainte géométrique (CCC) ou  $k_t$

$$\text{Soit :} \quad \sigma_G = \sigma_{\max} = \sigma_{nom} \cdot k_t \quad (I.6)$$

$\sigma_{nom}$ : Contrainte nominale appliquée sur l'entretoise

$k_t$ : Facteur de concentration de contraintes

Par convention, la contrainte nominale est la contrainte appliquée au tube soudé (entretoise); ainsi toute contrainte nominale est associée à une jonction entretoise membrure. Par conséquent, le coefficient de concentration de contrainte sera associé à son tour à cette jonction. Le point où  $\sigma_{\max}$  est atteint, est appelé le "point chaud" du nœud pour le chargement concerné. Ce point est mobile en fonction de la géométrie de l'assemblage et du chargement qui lui est appliqué [18].

#### **I.2.4.2.2. Influence des paramètres géométriques sur la valeur de la contrainte de dimensionnement ( $\sigma_G$ )**

La durée de vie d'un nœud varie en sens inverse de la contrainte géométrique, ce qui amène à chercher à réduire cette contrainte.

Il y a deux façons de réduire la valeur de la contrainte de dimensionnement.

- en réduisant la valeur du CCC du nœud
- en réduisant la valeur de la contrainte nominale dans l'entretoise.

Un examen de l'influence des paramètres géométriques sur la valeur du CCC et sur la valeur de la contrainte nominale permet de classer comme suit les modifications possibles de la géométrie du nœud, par ordre d'efficacité décroissante

- réduction de  $\gamma$  ( $\gamma=d/2T$ ) et  $\tau$  ( $\tau=t/T$ ) par augmentation de l'épaisseur de la membrure (T), ce qui conduit à un accroissement de la rigidité de la paroi de la membrure
- augmentation de  $\beta$  ( $\beta= d/D$ ) par augmentation du diamètre de l'entretoise (d);
- augmentation de  $\beta$  et simultanément réduction de  $\gamma$  par diminution du diamètre de la membrure(D).

On rappelle au concepteur les difficultés techniques que pose l'utilisation de parois de forte épaisseur [18].

#### **I.2.4.2.3. Facteur de concentration de contrainte**

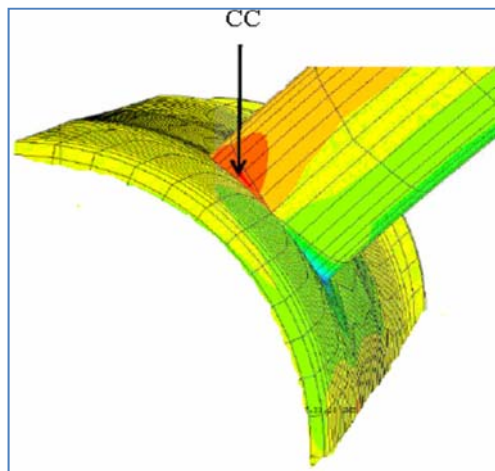
Le facteur de concentration de contrainte théorique ou indice de forme  $k_t$  en général et dans un joint soudé en particulier est défini est comme étant le rapport de la contrainte statique maximale dans la zone de discontinuité (entaille, trou,...) à la contrainte nominale dans la section nette Soit

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}} \quad (\text{I.7})$$

$\sigma_{\max}$  : est calculable par les méthodes numériques comme la méthode des éléments finis ou par les méthodes analytiques pour les géométries simples.

Elle est également mesurable par les techniques d'analyse de contraintes expérimentales comme la photo-élasticimétrie, l'extensomètre ou encore les méthodes thermiques.

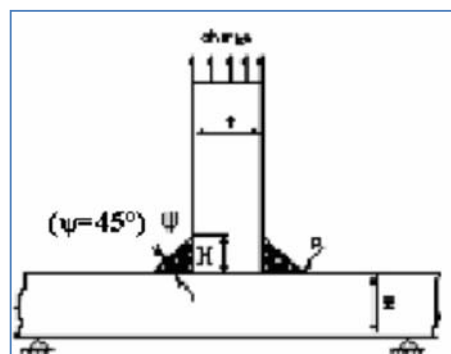
$\sigma_{nom}$ : est calculable à l'aide des formules de résistance des matériaux.



**Figure I.49** : Représentation des concentrations de contraintes  
Dans une structure tubulaire soudée

Le coefficient de concentration de contrainte dépend surtout du rayon au pied de cordon  $\rho$  de l'angle de raccordement  $\psi$  mais aussi de la géométrie du joint soudé et du mode de chargement.

Divers formules de calcul du coefficient de concentration de contrainte sont proposées dans la littérature. Certaines formules simplifiées ne prennent pas en compte l'ensemble des paramètres [18].



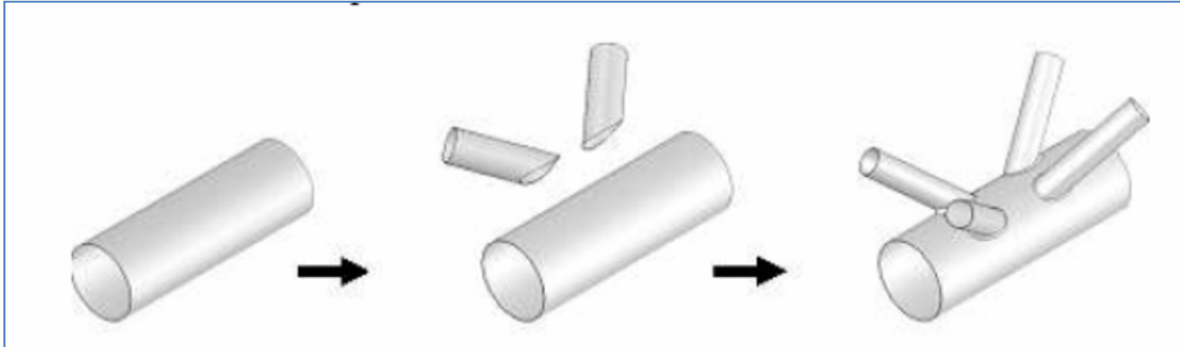
**Figure I.50** : Représentation des caractéristiques du cordon de soudure  
Dans la zone de concentration de contraintes

## I.2.5. Technique d'assemblage de tubes

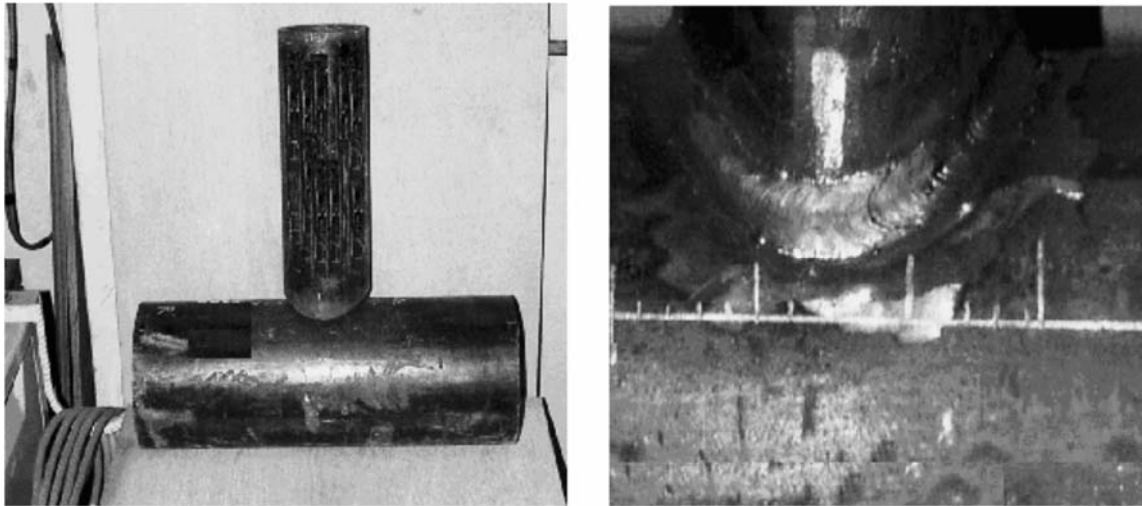
### I.2.5.1. Assemblage par soudage traditionnelle

Traditionnellement, l'assemblage de tubes est réalisé par soudage[3], ce qui nécessite des opérations de préparations complexes, telles que les découpes d'extrémités des tubes secondaires (dites en« gueule de loup »), la confection de gabarits de positionnement, le

repérage et le positionnement des éléments. Ainsi, vu le coût en main d'œuvre que demandent ces différentes opérations, le choix des profilés tubulaires est parfois écarté pour des raisons économiques.



*Figure I .51: Technique d'assemblage traditionnelle*



*Figure I .52 : Positions avant et après soudage d'un tube en T*

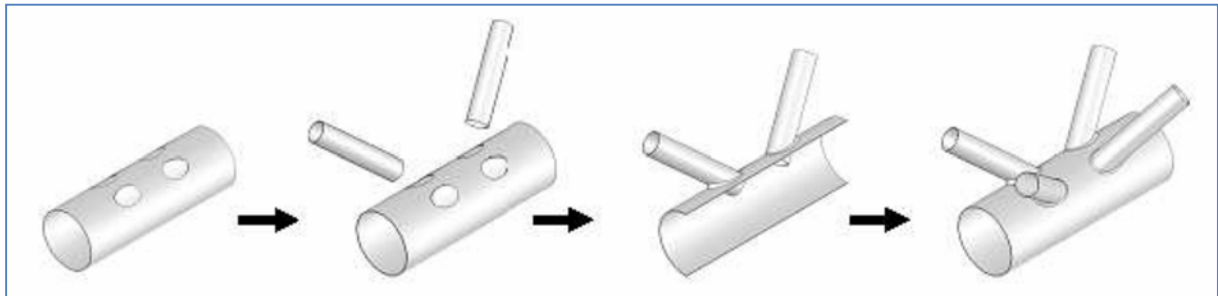


*Figure I .53 : Soudage d'éléments tubulaires*

### **I.2.5.2. Assemblage par pré-perçage**

Dans le but de pallier les inconvénients actuels des assemblages tubulaires, une nouvelle méthode d'assemblages par pré-perçage de la membrure a vu le jour, permettant de simplifier les opérations traditionnelles. Cette technique consiste en une découpe des éléments

principaux (membrures d'une poutre treillis par exemple), pour y imbriquer directement les éléments secondaires. Un cordon de soudure est ensuite réalisé comme dans la technique classique



**Figure I.54:** Technique d'assemblage par pré-perçage de la membrure

Cette nouvelle technique possède toute une série d'avantages par rapport à la méthode classique au point de vue de la préparation des tubes, du montage en atelier et de la galvanisation. Elle permet une diminution du coût total des structures tubulaires [18].

### **1.2.5.3. Amélioration du pied du cordon de soudure par l'emploi de procédés de soudage appropriés**

L'utilisation d'électrodes spéciales permet d'assurer une transition progressive de la géométrie de raccordement au pied du cordon de soudure et ainsi, de réduire la valeur de la concentration totale.

On utilise communément deux techniques :

- l'emploi d'électrodes à coulabilité améliorée,
- la réalisation d'une passe supplémentaire avec des électrodes à coulabilité améliorée.

Ces deux techniques ont été utilisées principalement au Japon. La première technique (utilisation d'électrodes à coulabilité améliorée) ne demande aucun travail supplémentaire après le soudage. C'est le choix de l'électrode, avec un enrobage convenable, qui permet d'obtenir un raccordement géométrique très progressif entre le cordon et la paroi au moins pour un soudage à plat.

Ceci est dû à une bonne coulabilité du métal d'apport.

La deuxième technique consiste en l'exécution d'une passe supplémentaire, avec une électrode à coulabilité améliorée. Elle ne doit pas être confondue avec le beurrage.

Il est peu probable que les bons résultats obtenus pour un soudage en position horizontale ou à plat soient valables pour toutes les positions de soudage [18].

### I.2.5.4. Conditions relatives à la préparation des bords des tubes et au profil du cordon de soudure

Les règles données à la figure I.55. Correspondent au cas où il n'est pas possible de reprendre à l'envers les joints soudés.

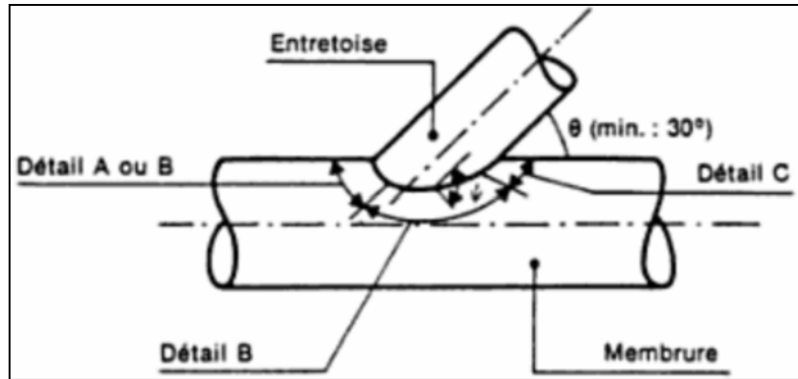


Figure I .55: Préparation et profil des cordons de soudure

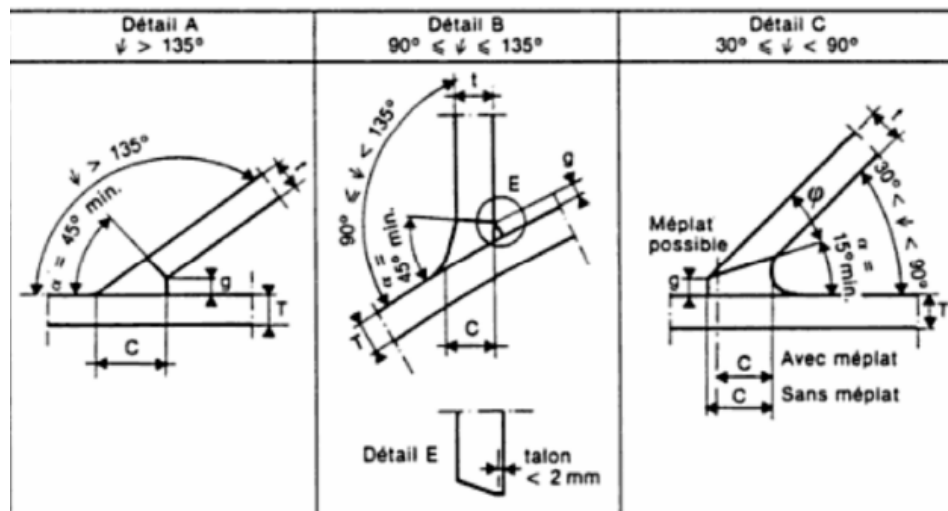


Figure I .56: Règles de préparation et profil des cordons de soudures

| Détail | Inclinaison                         | Min.C  |
|--------|-------------------------------------|--|
| A      | $\psi > 135^\circ$                  | $Min \begin{cases} 1.75t \\ t / \sin \psi \end{cases}$ |
| B      | $90^\circ \leq \psi \leq 135^\circ$ | 1.25 t   |
| C      | $50^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$  | 1.25 t   |
|        | $35^\circ \leq \psi \leq 50^\circ$  | 1.50 t   |
|        | $30^\circ \leq \psi \leq 35^\circ$  | 1.75 t   |

Tableau I.4. Distance est assurée par calage et pointage

| Angle d'ouverture $\alpha$           | Ecartement $g$ (mm) |
|--------------------------------------|---------------------|
| $\alpha < 45^\circ$                  | 3.0 à 6.5           |
| $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ | 1.5 à 5.0           |
| $\alpha > 90^\circ$                  | 0.0 à 5.0           |

Tableau I.5. Fonction de l'angle  $\psi$

Le tube venant se fixer sur une membrure doit respecter une certaine distance d'accostage ( $g$ ) définie au tableau I.4 de la figure I.56. Cette distance est assurée par calage et pointage.

La distance de la racine au pied du cordon de soudure est donnée dans le tableau I.5 de la figure I.57 en fonction de l'angle  $\psi$

La tolérance sur l'angle du chanfrein ( $\phi$ ), ( $\phi = \psi - \alpha$ ) est de  $+5^\circ$  si la saignée se referme, en raison des conditions de retrait différentiel consécutif à l'opération de soudage, on peut rouvrir la saignée par grugeage à l'arc, en respectant les conditions de sillon de la figure I .57.

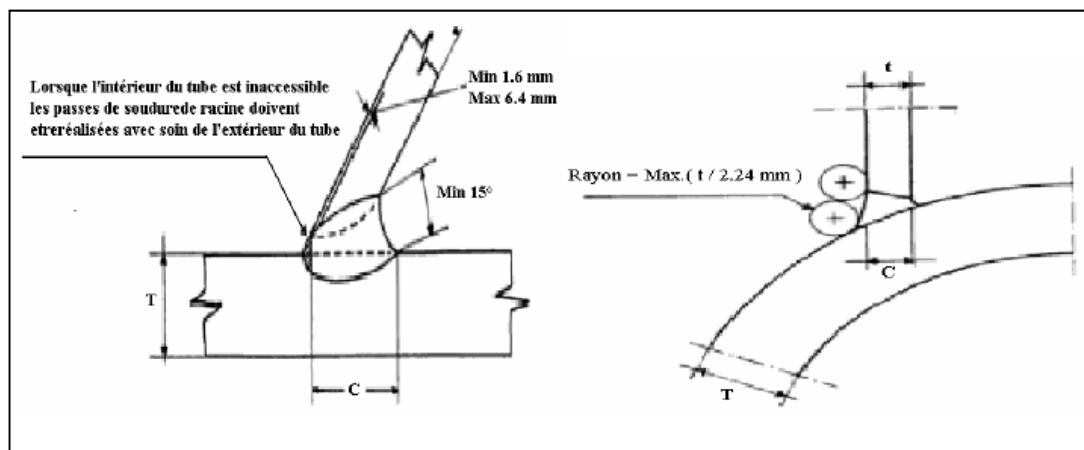


Figure I .57: Conditions de sillon.

L'intersection de deux (ou plusieurs) tubes forme un nœud d'assemblage de tubes pour lequel les concentrations de contraintes se produisent dans la zone de l'intersection; ces dernières sont fortement influencées par la géométrie locale du cordon de soudure. On comprend alors l'intérêt qu'il y a lieu d'accorder au soin avec lequel on réalise le cordon de soudure situé à l'intersection des tubes.

Si les pièces sont relativement épaisses, les points de soudure pour le pointage seront exécutés avec une électrode de plus petit diamètre que celles employées pour les passes de soudage, afin d'être sur de leur pénétration à fond de saignée. Les dimensions de ces points seront suffisantes (20 mm par exemple), pour qu'ils ne risquent pas de se rompre sous l'effet des déformations des pièces pendant le soudage [18].

#### **I.2.5.5. Dimensionnement des assemblages uni plans (X, T, K)**

Actuellement, les méthodes de dimensionnement des assemblages tubulaires se basent sur des formules semi empiriques. La plupart de ces formules de dimensionnement ont été développées par le CIDECT. Les formules de calcul de la résistance des assemblages en X, T et K sont basées sur une compression de la diagonale mais peuvent également être utilisées lorsque celle-ci est en traction.

Deux critères déterminent en général la charge de ruine:

- La plastification de la membrure ;
- La rupture par poinçonnement de la membrure.

Ces deux critères doivent impérativement être vérifiés [18].

**PARTIE II**  
**MODELISATION DES STRUCTURES**

## II. MODELISATION DE LA STRUCTURE TUBULAIRE ETUDIEE

### II.1 Objectif

Ce travail est axé principalement sur :

- Le calcul des concentrations des contraintes, dans les joints tubulaires en T,
- L'étude de l'influence du mode de chargement (traction, flexion) sur les valeurs des contraintes.

### II.2. INTRODUCTION :

La simulation numérique est l'un des outils permettant de simuler des phénomènes réels. Appelée aussi simulation informatique, elle désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur au vue de simuler par exemple un phénomène physique complexe (ex: chute d'un corps sur un support mou, résistance d'une plateforme pétrolière à la houle, fatigue d'un matériau sous sollicitation vibratoire, usure d'un roulement à billes, ...).

Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique dite des éléments finis. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On parle également de calcul numérique. Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse.

Pour les projets actuels, la MEF est souvent utilisée pour prédire la déformation de la structure en service et fournir des données relatives à la phase de construction (déplacement et déformation en cours de construction). Le calcul par la MEF est souvent effectué afin de vérifier le comportement constaté du dispositif [19].

L'analyse de type éléments finis d'une structure peut notamment comporter les étapes suivantes:

La définition des conditions aux limites.

- Le choix de la relation déformations-contraintes des matériaux utilisés,
- Les caractéristiques mécaniques des interfaces, la définition des chargements,
- La visualisation des résultats [19].

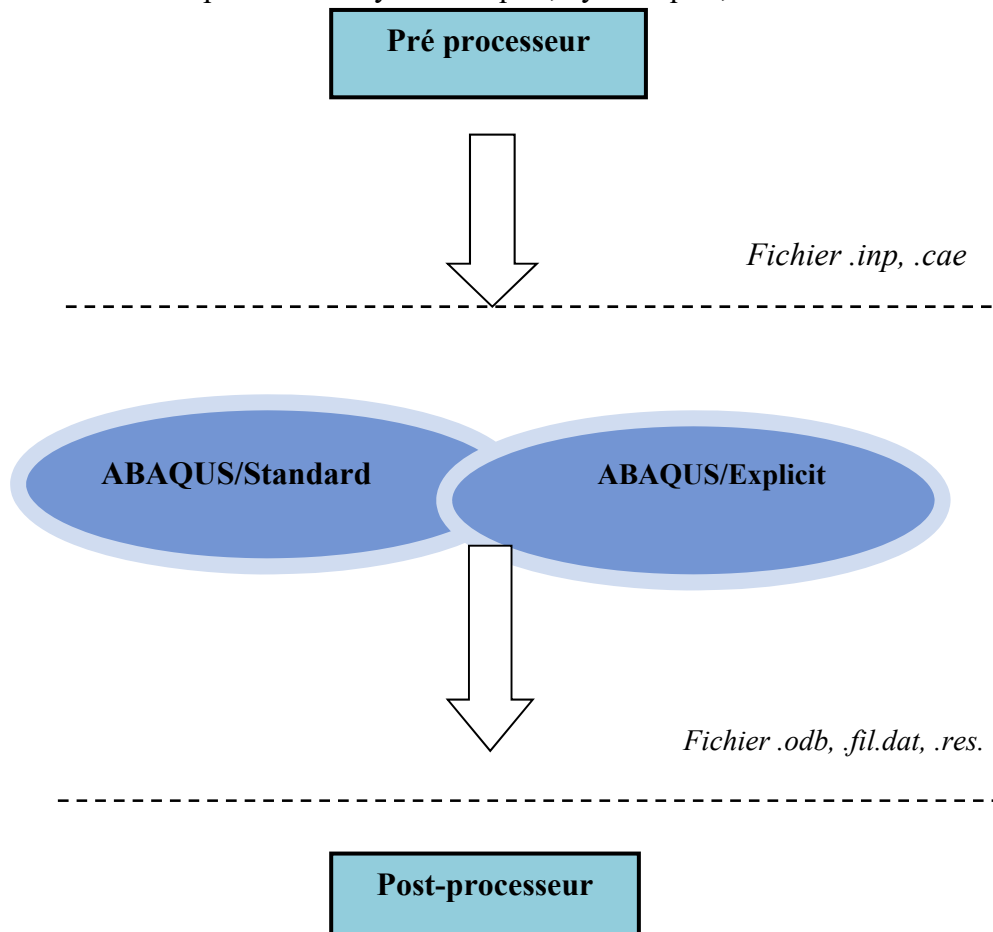
## II.3.CONDUITE DE LA SIMULATION :

### II. 3.1. Présentation générale d'abaque :

ABAQUS est un code de calcul utilisant la MEF créé en 1978. Selon la méthode de résolution, on distingue deux grands codes :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite,
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.

La version que nous avons utilisée, ABAQUS 6.9.1, permet de traiter des problèmes couplés (hydromécanique, thermomécanique ...) dans les divers domaines (mécaniques, thermiques, électriques ...). Un très large choix d'éléments (plus de 100) en 2D ou 3D est proposé dans le code pour des analyses statiques, dynamiques, linéaires et non-linéaires [20].



*Figure. II.1 : Structure d'une analyse ABAQUS [20].*

Le pré-processeur lit le fichier d'entrée qui définit la géométrie du modèle, sa discrétisation, les conditions aux limites, les chargements appliqués et les résultats demandés. Ensuite ABAQUS

exécute le calcul, le post-processeur se charge de récupérer les résultats et permet aux utilisateurs de les visualiser puis de les exploiter. Plus de détails concernant l'utilisation d'ABAQUS seront donnés par la suite [20].

- ✓ Domaines physiques:

Mécanique, Thermique, Électrique, Problèmes couplés.

- ✓ Problèmes: Statique et dynamique, Linéaires et non linéaires.

✓ Catégories d'éléments: Milieu continu (2D et 3D), Poutres, plaques, coques, Éléments spéciaux (ressorts, masses,...)

✓ Géométries: Approximations linéaires et quadratiques, Triangles, quadrangles, hexaèdres, tétraèdres, pentaèdres

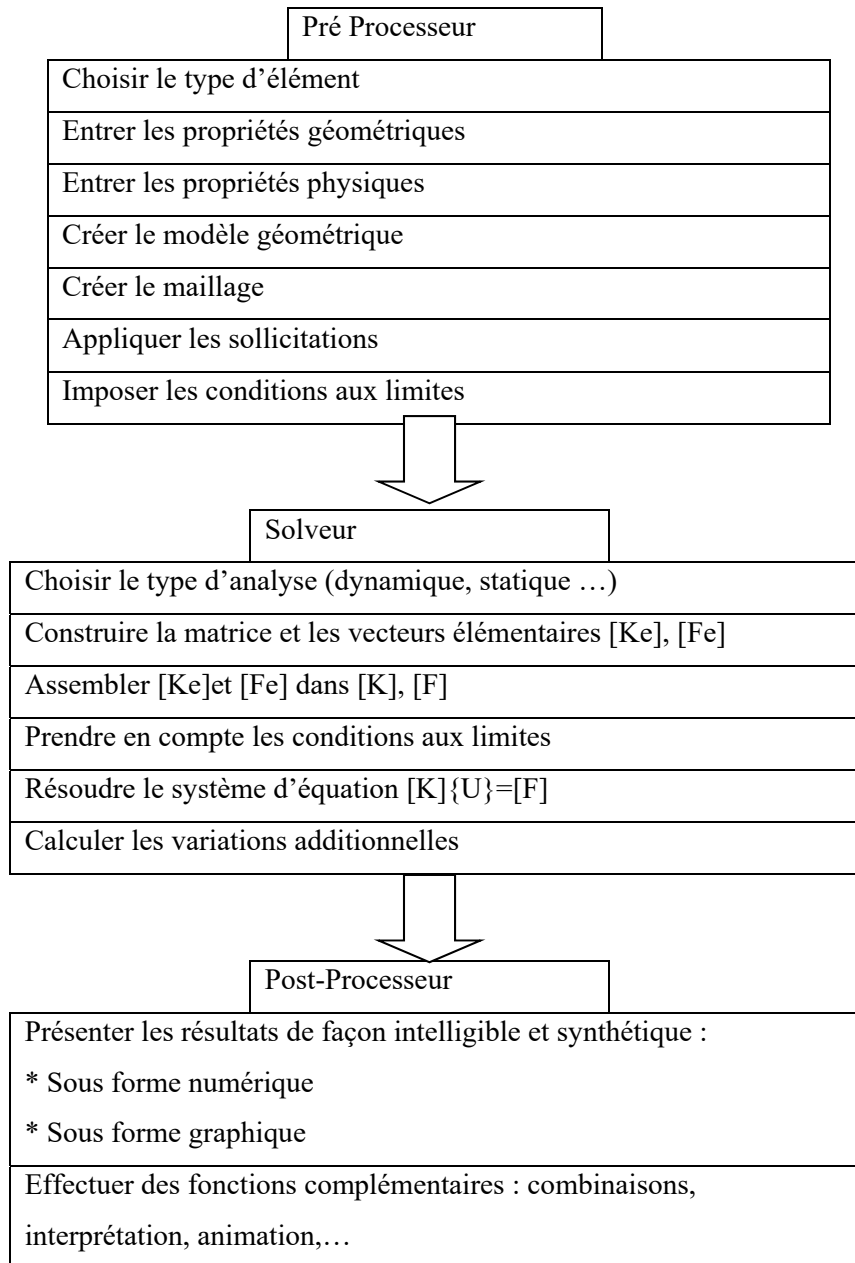
- ✓ Un très large choix d'éléments (plus de 100).

- ✓ Beaucoup moins d'éléments disponibles sur ABAQUS/Explicit.

✓ Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard).

### II.3.2. Le code de calcul abaques :

#### II.3.2.1. Structure générale d'un code de calcul : [19]



*Figure. II.2 : Structure générale d'un code*

## II. 4 .Méthodologie

Le calcul dans le domaine élastique des joints tubulaires en acier s'appuie sur l'étude de la distribution des contraintes au voisinage du cordon de soudure situé sur la membrure et l'entretoise pour une sollicitation de la structure appliquée à l'extrémité supérieure de l'entretoise. Cette sollicitation génère dans chaque élément fini constituant le cordon de soudure une répartition de contraintes géométriques unique qui lui est propre. L'ensemble des contraintes géométriques maximales prélevées une à une sur chaque élément fini définit la distribution des contraintes au voisinage du cordon de soudure.

Parmi toutes les méthodes existantes, la méthode des éléments finis paraît la mieux appropriée, car elle prend en compte toutes les complexités et discontinuités géométriques de la structure.

## II.5. Géométrie de la structure étudiée

La structure étudiée est une structure tubulaire soudée en forme de T que l'on rencontre souvent dans les plates formes marine offshore. Elle est composée d'un tube secondaire (entretoise) de diamètre  $d$  et de longueur  $l$  relié à un tube principal (membrure) de diamètre  $D$  et de longueur  $L$  par un cordon de soudure. Sa géométrie est représentée par les figures II.3.a et II.3.b

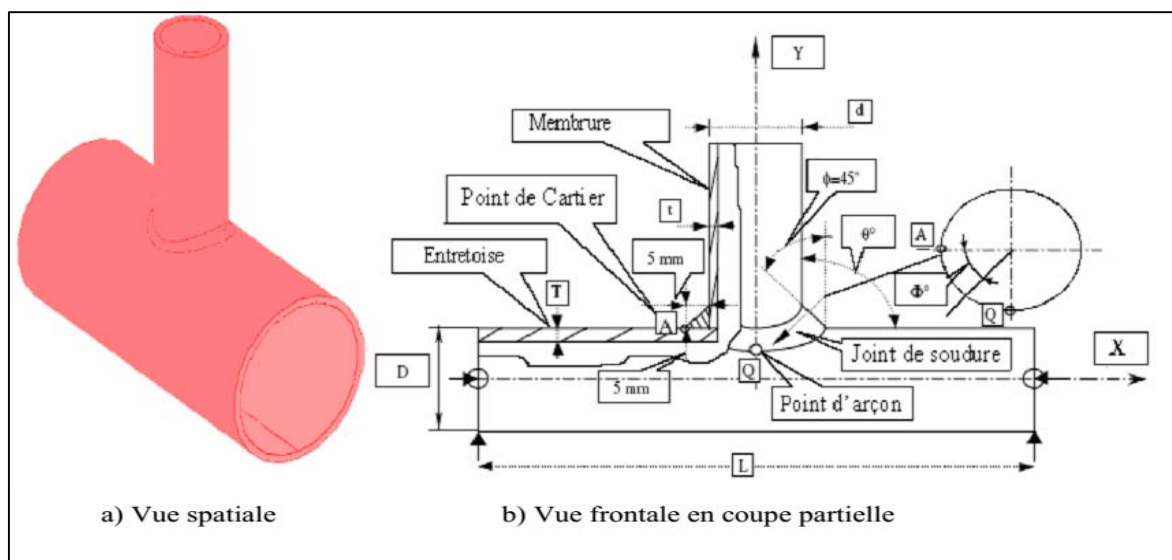


Figure II. 3 : a et b Géométrie de la structure étudié

## II.6. Paramètres de la structure tubulaire soudée en T étudiée

Dans cette étude nous avons utilisé le logiciel de CAO (SOLIDWORKS) pour le dessin des deux composantes de la structure.

Les Paramètres utilisés pour l'analyse de cette structure sont consignés dans le tableau II.1 suivant :

| membrure           | entretoise                 |
|--------------------|----------------------------|
| <b>L = 1100 mm</b> | <b>d = 300 mm</b>          |
| <b>D = 500 mm</b>  | <b>t = 10 mm</b>           |
| <b>T = 12.5 mm</b> | <b>Soudure ; 5mm x 5mm</b> |

Tableau II.1 : Paramètre de la structure tubulaire

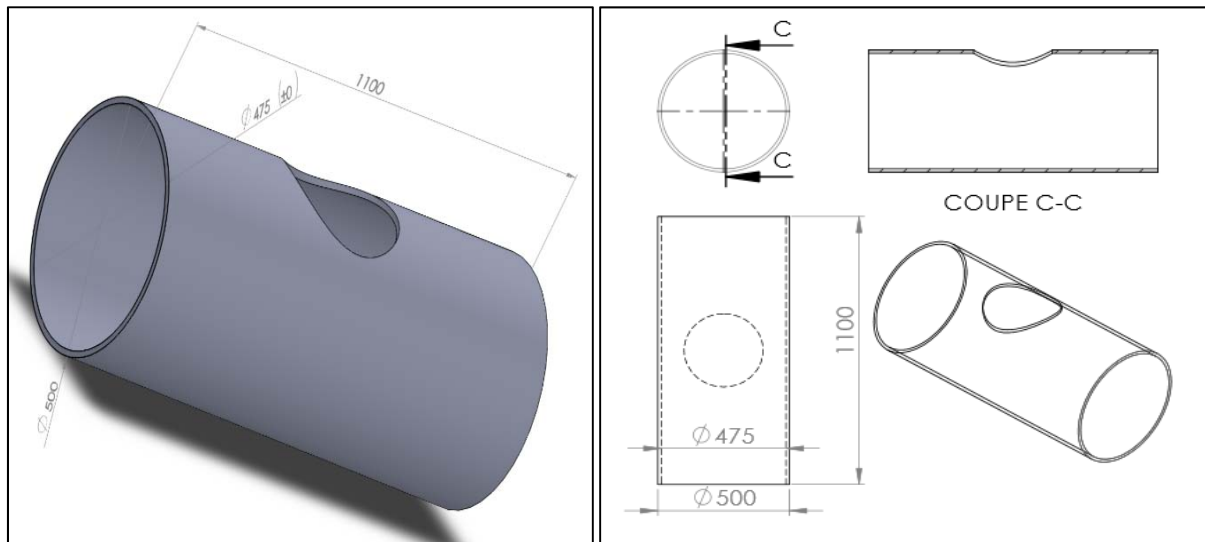


Figure II.4 : Géométrie de la membrure

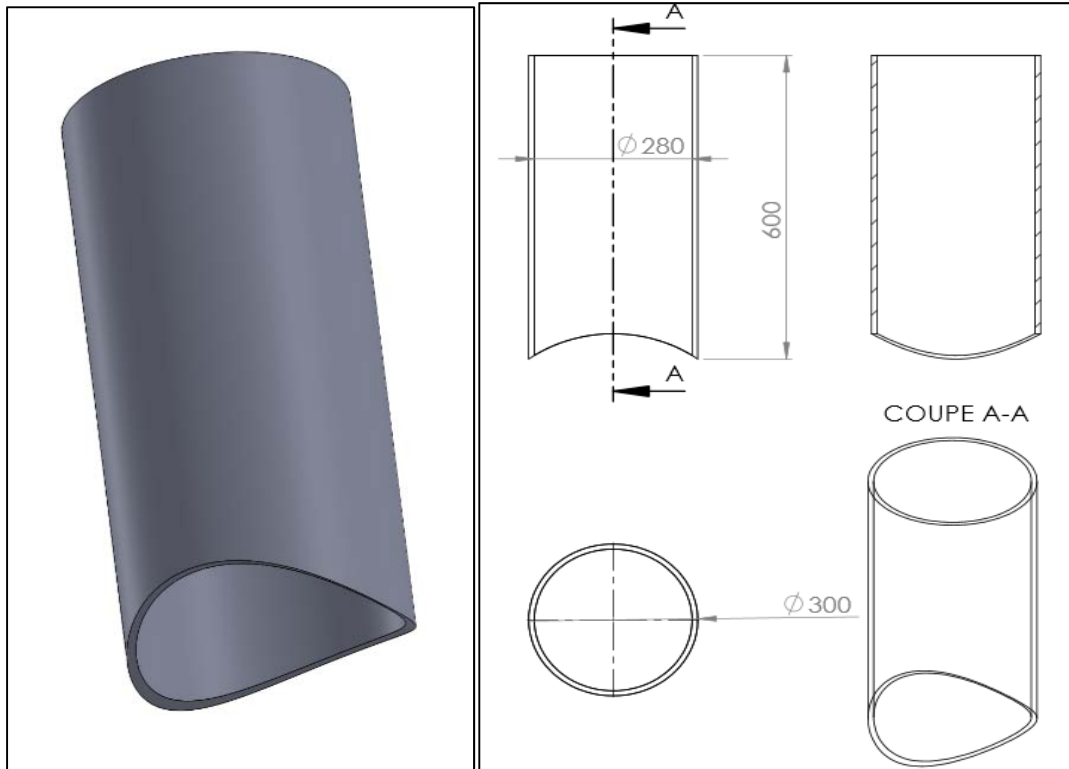


Figure II. 5 : Géométrie de l'entretoise

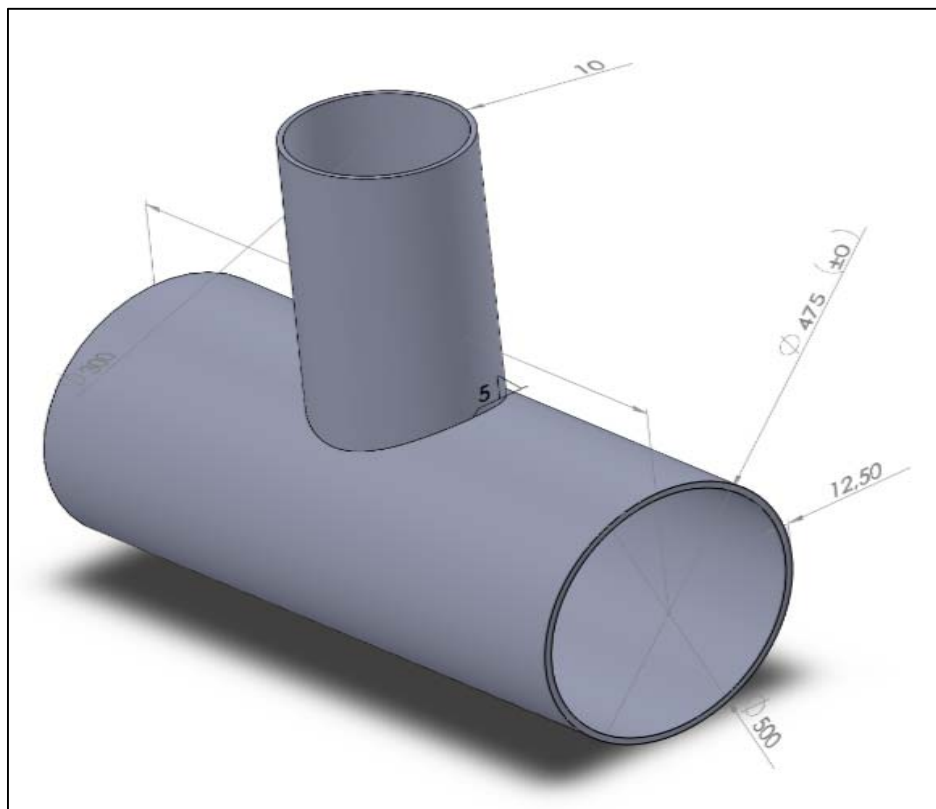


Figure II. 6 : Géométrie de la structure

La structure étudiée est constituée d'un acier ordinaire dont caractéristiques mécaniques sont ;

|   |  |
|---|--|
| - <i>Module d'élasticité</i> :                | $E = 207 \text{ GPa.}$                     |
| - <i>Coefficient de Poisson</i> :             | $\nu = 0.3$                                |
| - <i>Limite d'élasticité</i> :                | $R_e = 235 \text{ MPa.}$                   |
| - <i>Résistance maximale</i> :                | $R_m = 360 \text{ MPa.}$                   |
| - <i>Masse volumique</i> :                    | $\rho = 7.8 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$ |
| - <i>coefficient de dilatation linéaire</i> : | $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-6}$               |

Tableau II.2 : caractéristiques mécaniques

## II.7. Chargement appliqué à la structure

Les sollicitations prises en compte dans le calcul d'un nœud et qui vont être appliquées sur chaque entretoise sont alors :

- l'effort normal  $N_x$  (traction),
- le moment fléchissant  $M_y$  : flexion dans le plan (fdp),
- le moment fléchissant  $M_z$ : flexion hors du plan (fhdp).
- Les autres sollicitations sont négligées

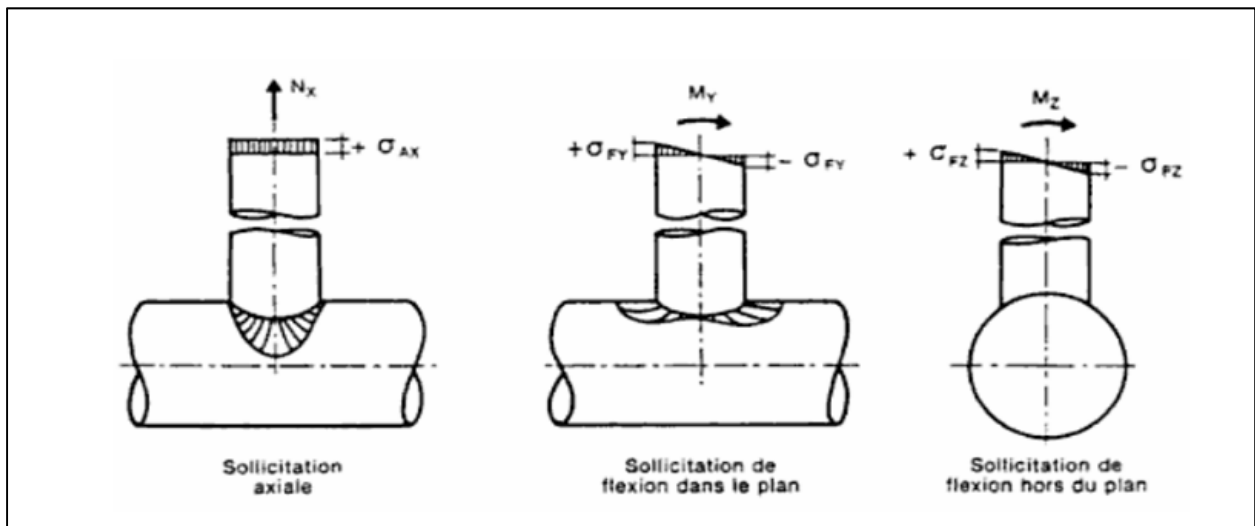
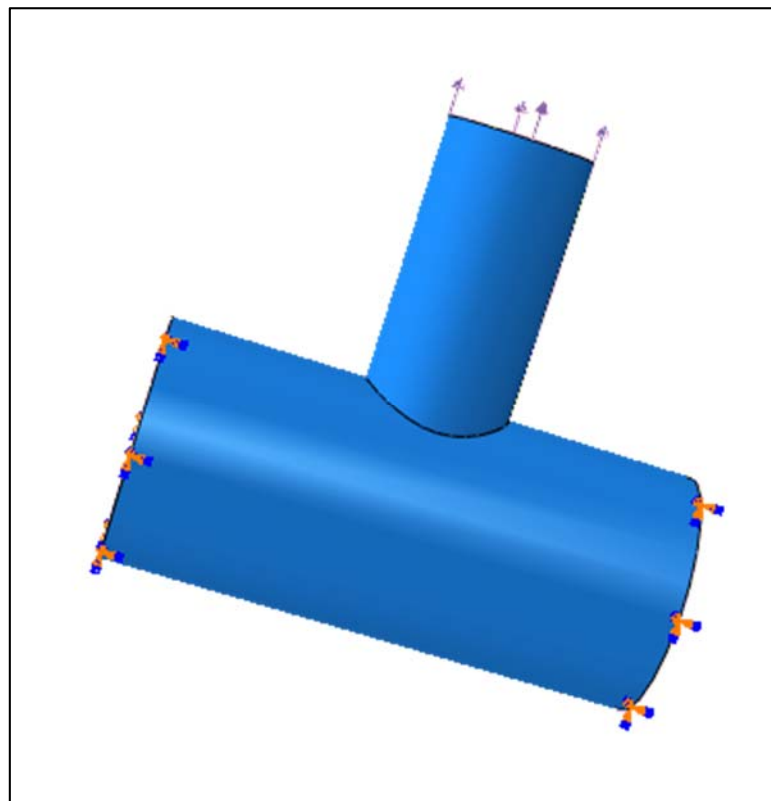


Figure II. 7 : Sollicitation prises en compte dans les formules de résistance statique

## II.8. Conditions aux limites

Pour une structure fixe les déplacements d'ensemble sont nuls. On considère le blocage de toutes les translations ( $U_x$ ,  $U_y$  et  $U_z$ ) et des rotations suivant les axes X et Y et Z ( $R_x$  et  $R_y$  et  $R_z$ ).

On ne tient pas compte des composantes du cisaillement transversal et du moment de torsion qui est habituellement négligées puisque ces charges n'induisent pas une flexion dans la peau de la membrure. Ce pendant dans certains cas particuliers, leurs effets doivent être évalués. La traction axiale, la flexion dans le plan et la flexion hors du plan sont normalement des critères suffisant pour le calcul de dimensionnement des jonctions tubulaires.



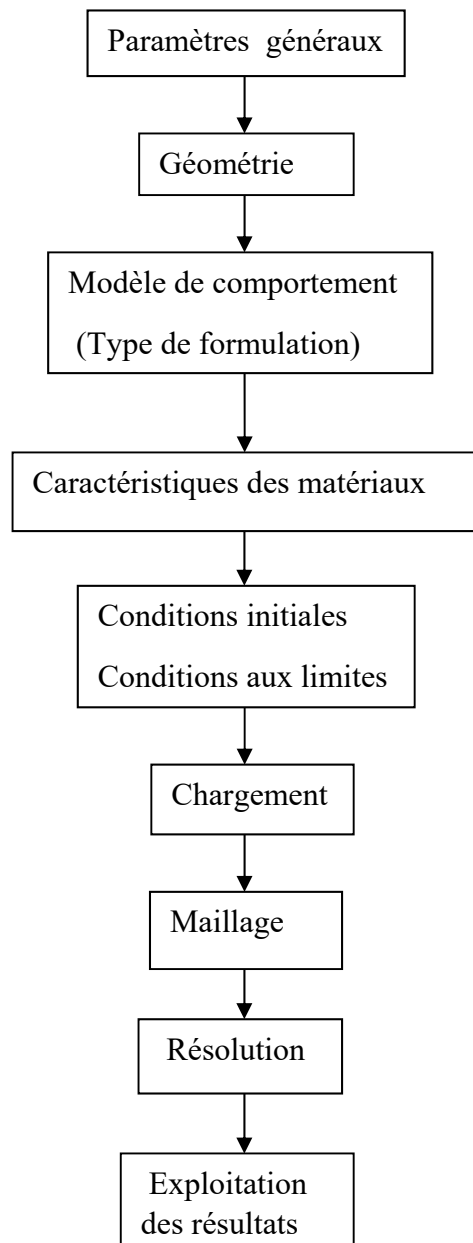
*Figure II. 8 : Conditions aux limites*

### II.8.1. Etapes du processus de modélisation

Dans cette étude nous avons utilisé le code de calcul de structures Abaqus6.12 qui est un logiciel de calcul mettant en œuvre la méthode des éléments finis afin de résoudre des modèles discrétisés.

- Définition de la géométrie, en précisant le physique
- Sélection des propriétés du matériau
- Sélection des conditions initiales et conditions aux limites
- Maillage,

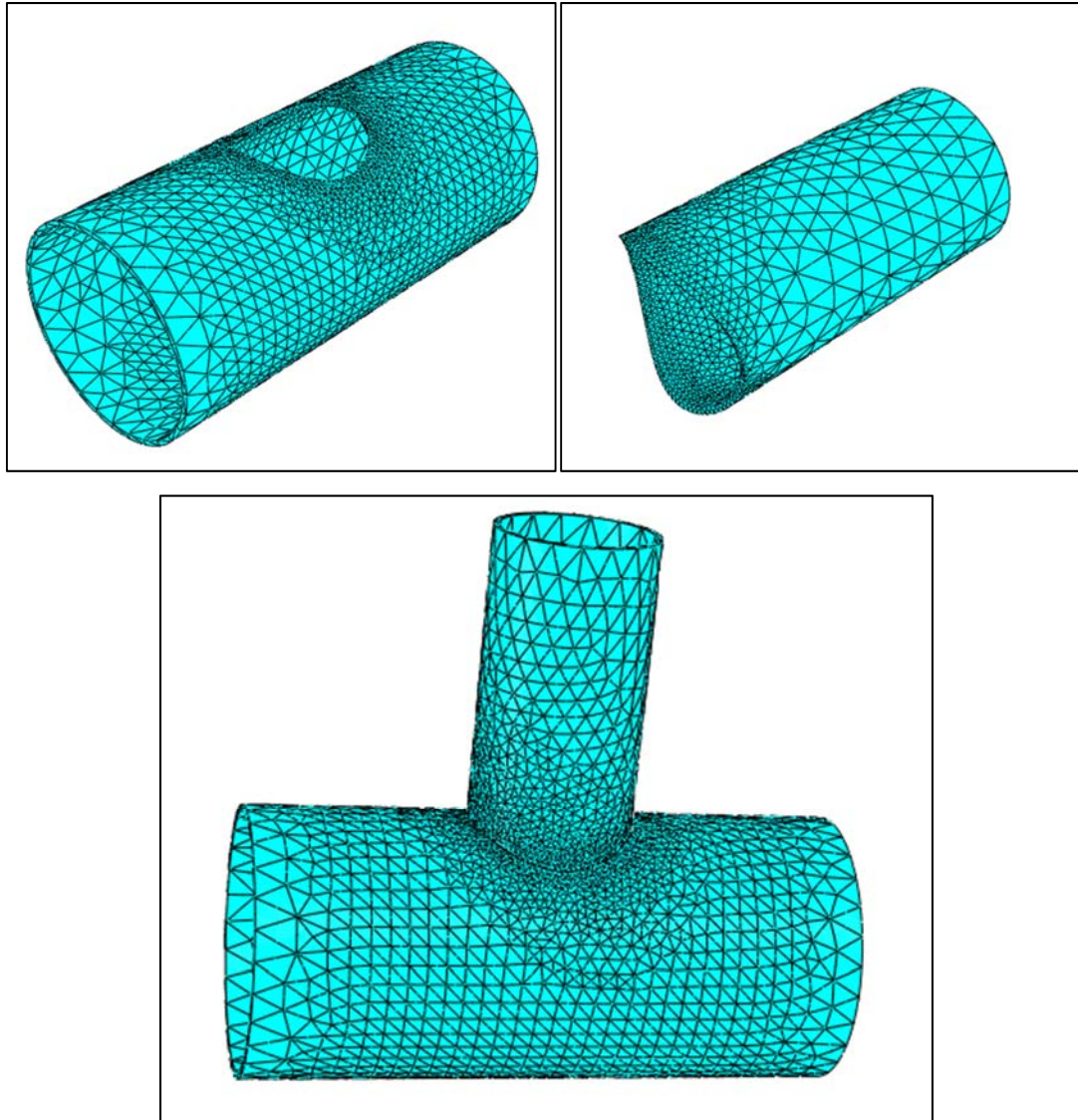
- Résolution du problème
- Post-traitement des résultats.



*Figure II.9 : Organigramme général pour la résolution d'un problème avec Comsol multiphysics*

**II.8.2. Discrétisation :**

Le logiciel utilisé est ABAQUE 6-12.1 largement utilisé dans les domaines de recherche, type d'élément fini utilisé est le (3D STRESS), type de maillage est (tétraèdre 4 nœuds) maillage structuré consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs compartiments



*Figure II.10: Modèle discrétisé*

## II.9. RESULTATS

## 1. CAS DE TRACTION

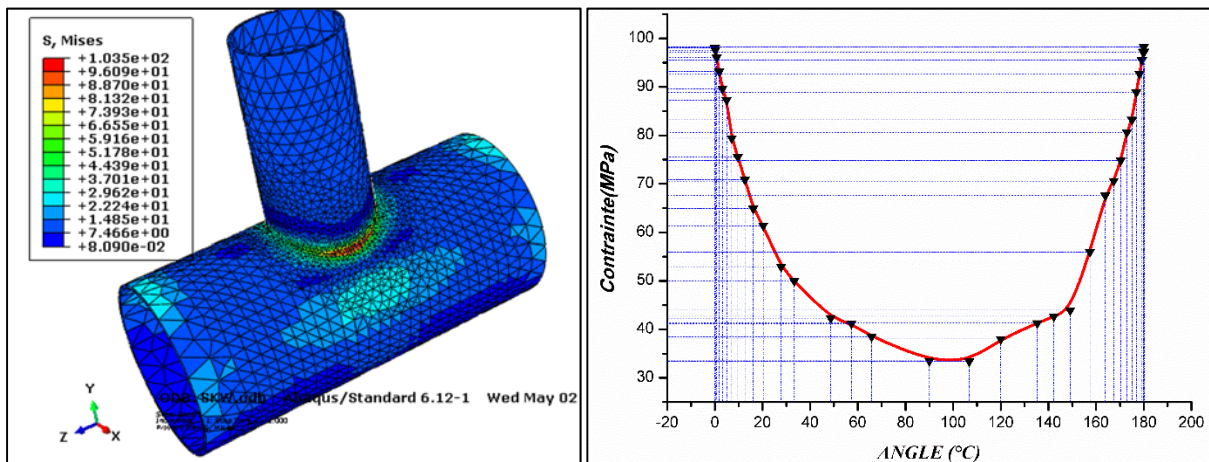
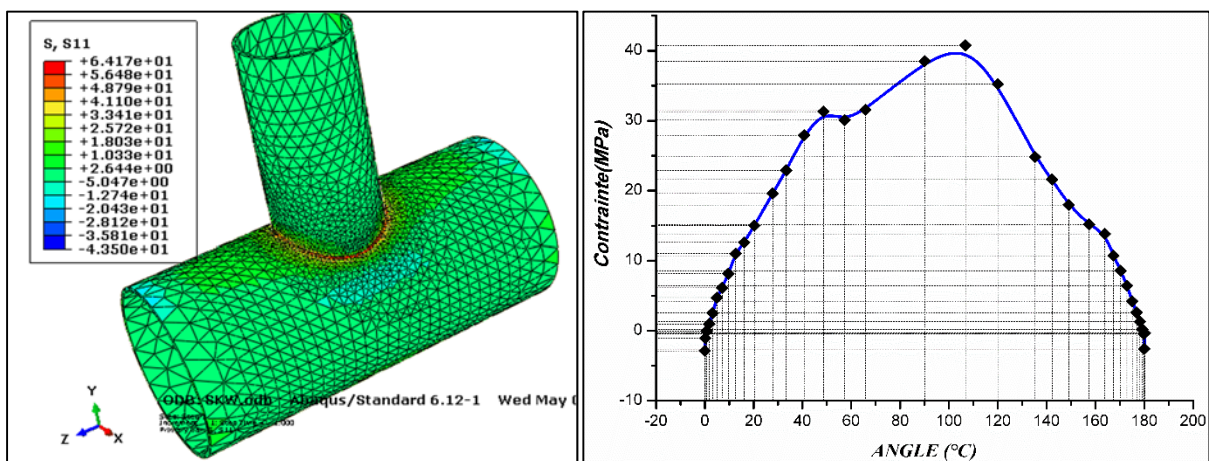


Figure II .11: Distribution des contraintes V. Mises

## Interprétation :

La figure II.11 montre l'existence de deux points chauds de concentration de contrainte (contrainte Von mises atteint une valeur maximale) au niveau du cordon de soudure situés respectivement aux  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=180^\circ$  et de valeurs  $1,035 \cdot 10^2$  Mpa et  $1,035 \cdot 10^2$  Mpa. Avec une symétrie par rapport au point  $\theta = 90^\circ$  ceci est due à la charge de traction la quelle est soumise le cordon de soudure.

Figure II .12: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{xx}$

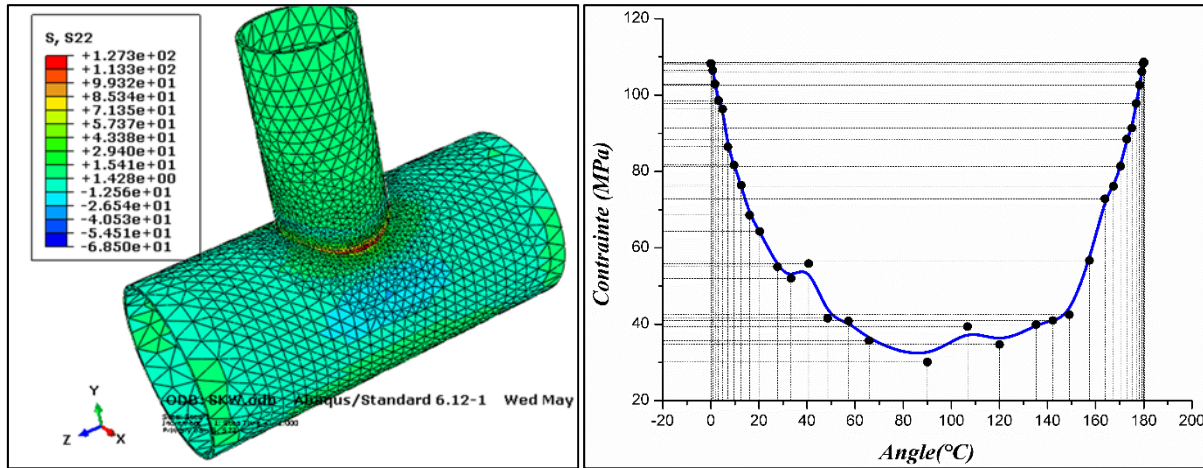


Figure II .13: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{yy}$

Interprétation :

Sur les figures. 13et 12, on remarque que les contraintes  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$  présentent une symétrie dans l'allure des courbes, et qu'elles ont des valeurs des contraintes différentes. On constate que les zones fragiles sont localisées respectivement aux point  $\theta = 90^\circ$  pour  $\sigma_{yy}$  et aux points  $\theta = 0^\circ \theta = 180^\circ$  pour  $\sigma_{xx}$

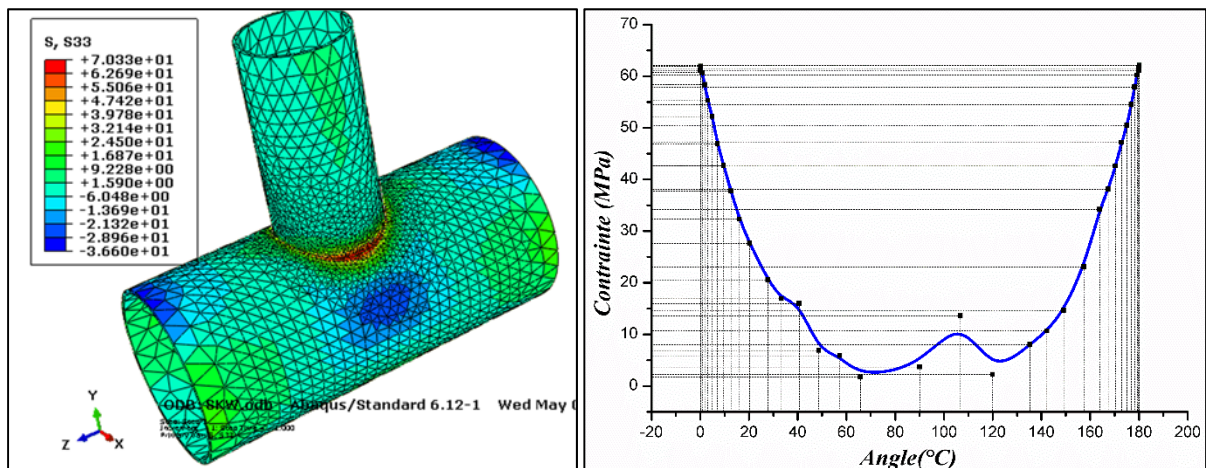


Figure II .14: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{zz}$

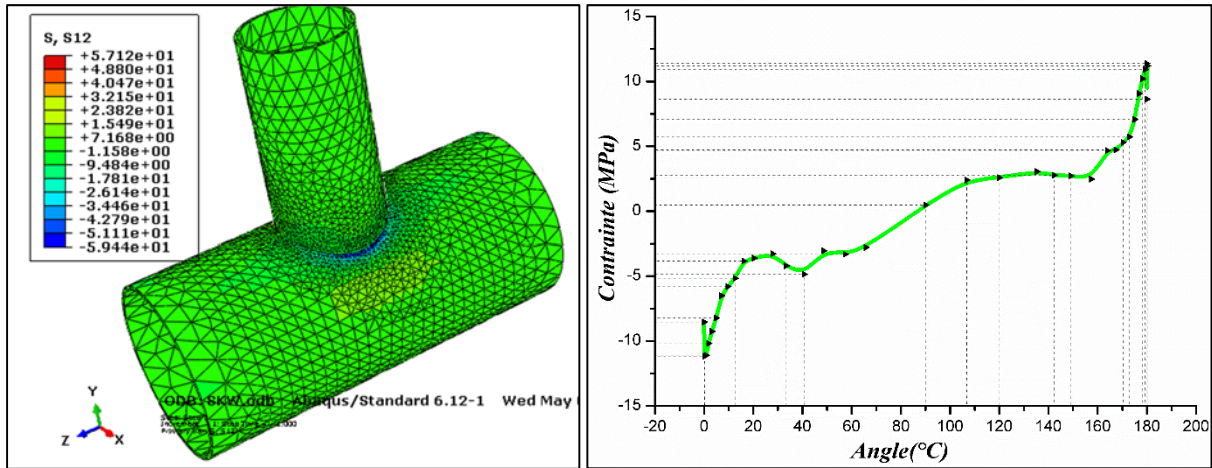


Figure II.15: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xy}$

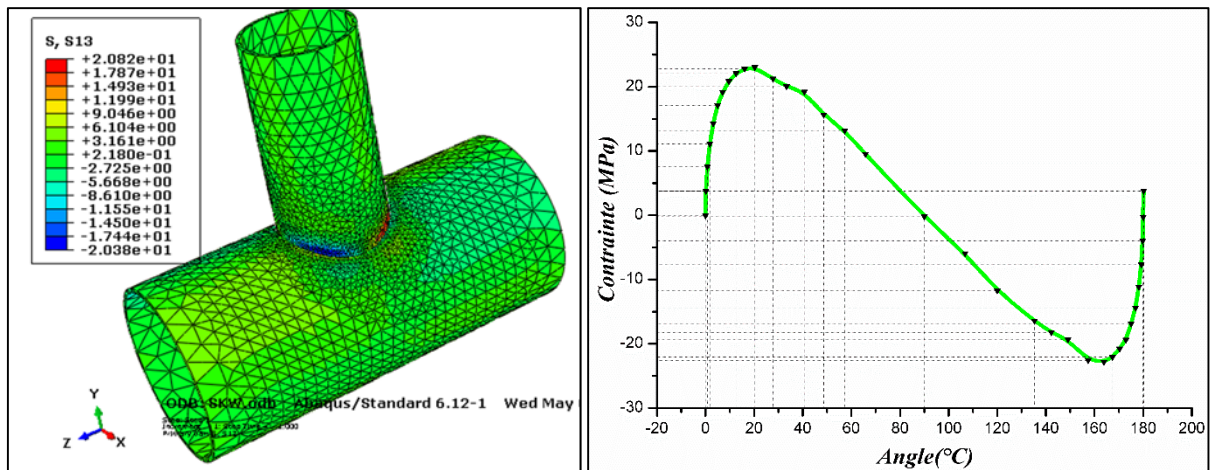


Figure II.16: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xz}$

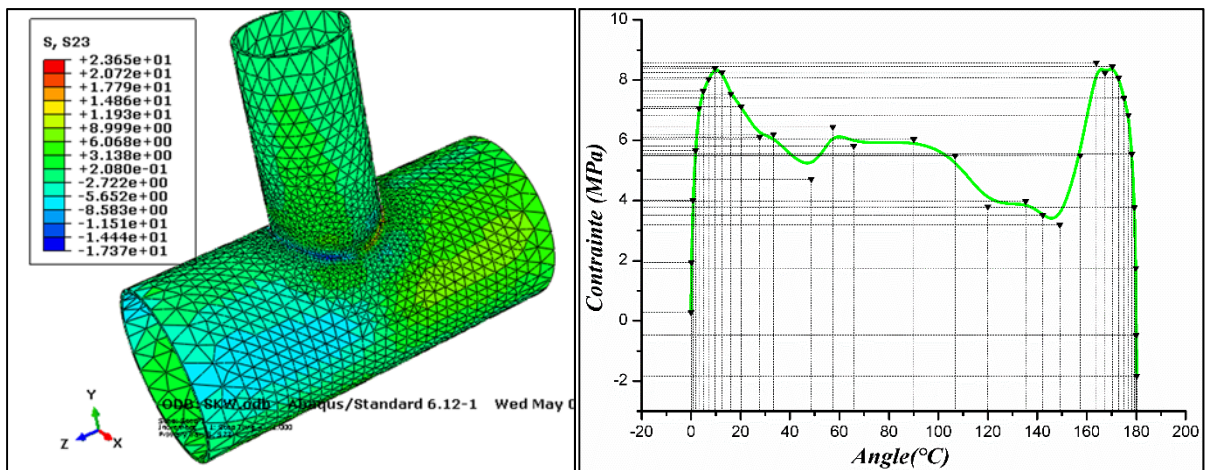


Figure II.17: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{yz}$

2. CAS DE FLEXION DANS LE PLAN

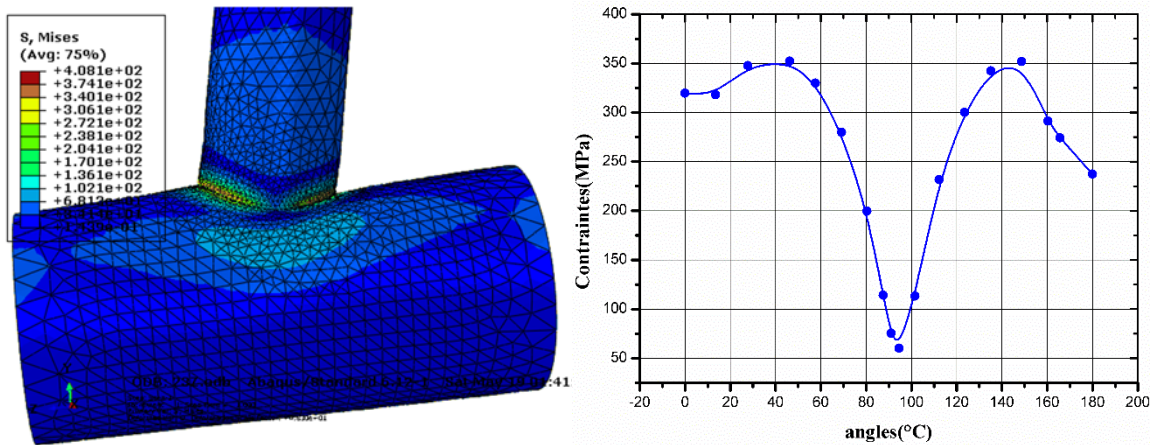


Figure II.18: Distribution des contraintes V. Mises

Interprétation :

Montre qu'il existe deux points de contrainte von mises au niveau de cordon soudure sitné aux  $\theta=40^\circ$  et  $\theta=140^\circ$  de valeur de  $4,681.10^2$  MPa comme une valeur maximal .

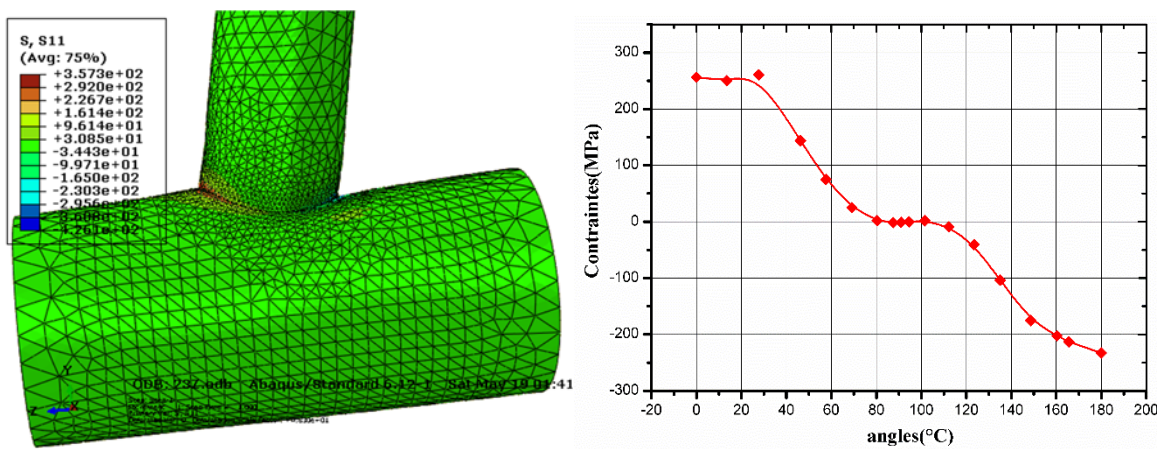


Figure II.19: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{xx}$

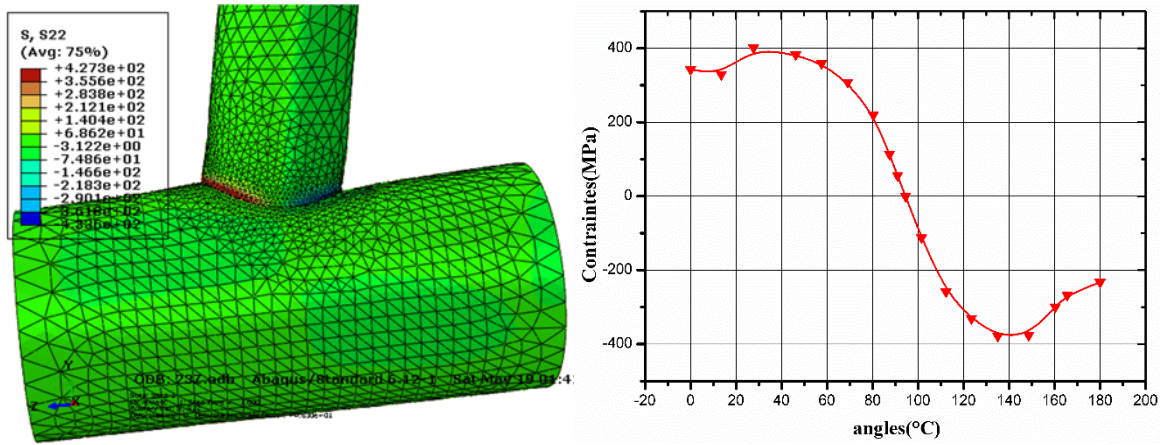


Figure II .20: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{yy}$

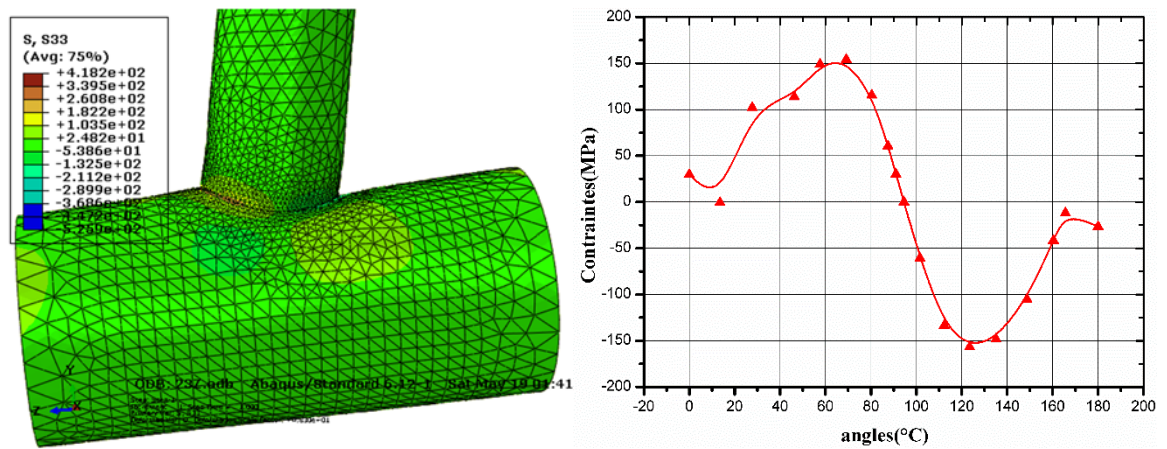


Figure II .21: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{zz}$

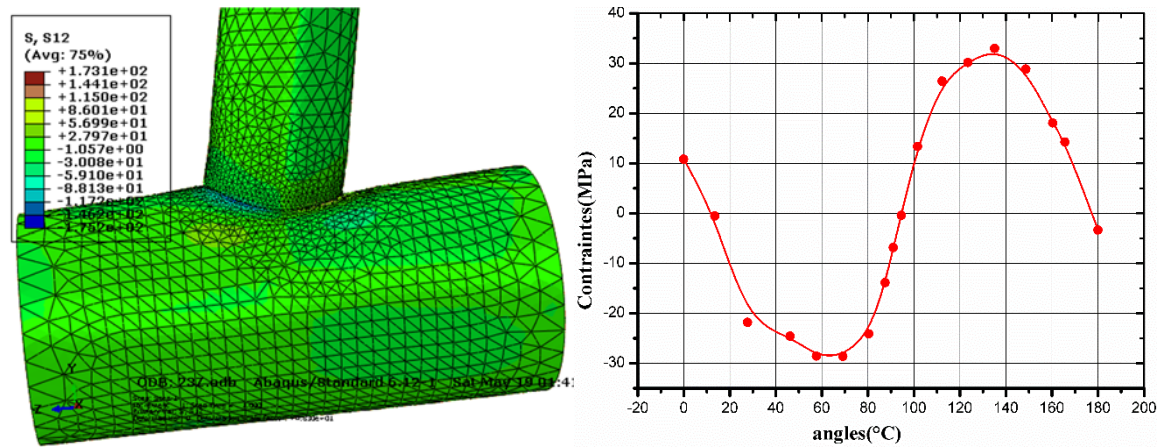


Figure II .22: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xy}$

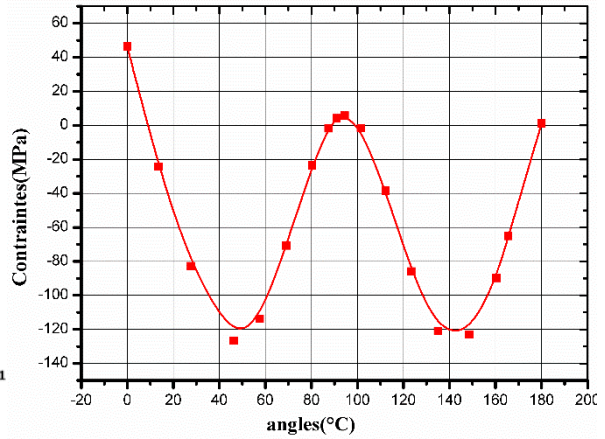
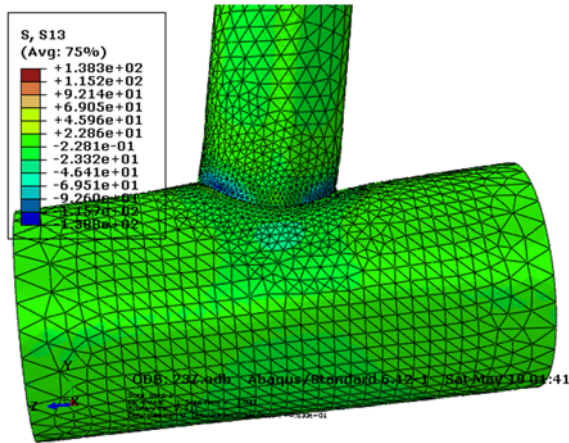


Figure II .23: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xz}$

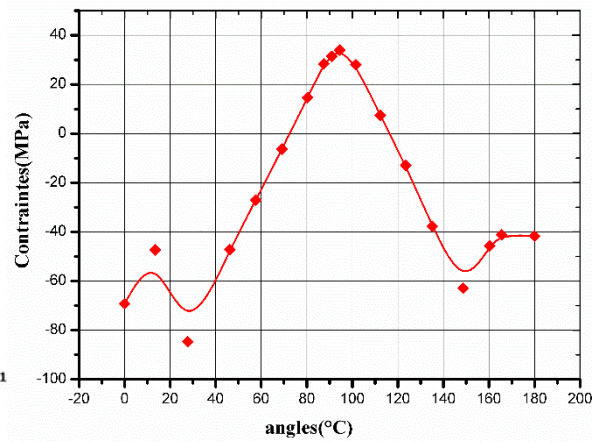
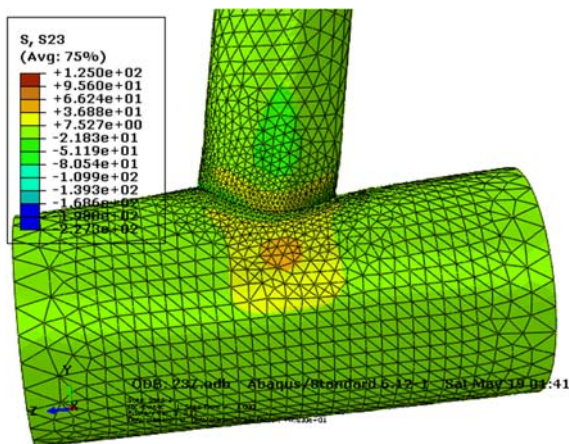


Figure II .24: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{yz}$

### 3. CAS DE FLEXION HORS DE PLAN

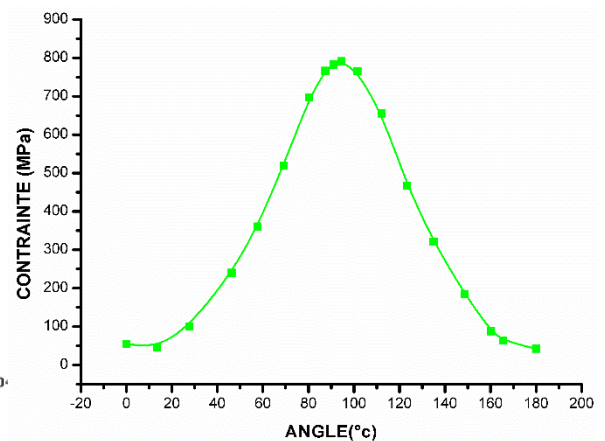
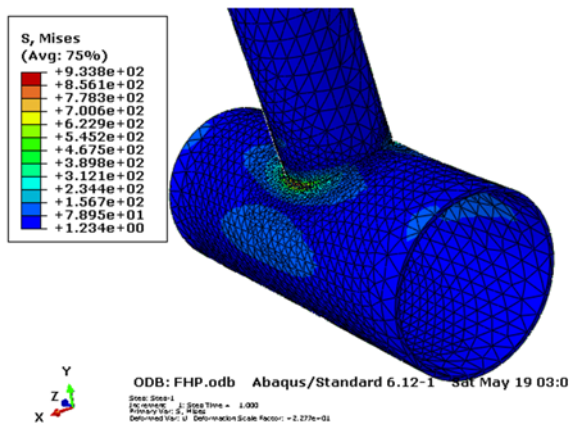


Figure II .25: Distribution des contraintes V. Mises

Interprétation :

On observe sur la figure II .25 la présence d'un point de concentration de contrainte au niveau du cordon d'une valeur max du contrainte atteint à  $9,338.10^2$  Mpa, au point  $\theta=90^\circ$

avec des faible valeurs des contraintes situes respectivement aux points  $\theta = 0^\circ$

$\theta = 180^\circ$  ceci est due au type de chargement de flexion hors de plan

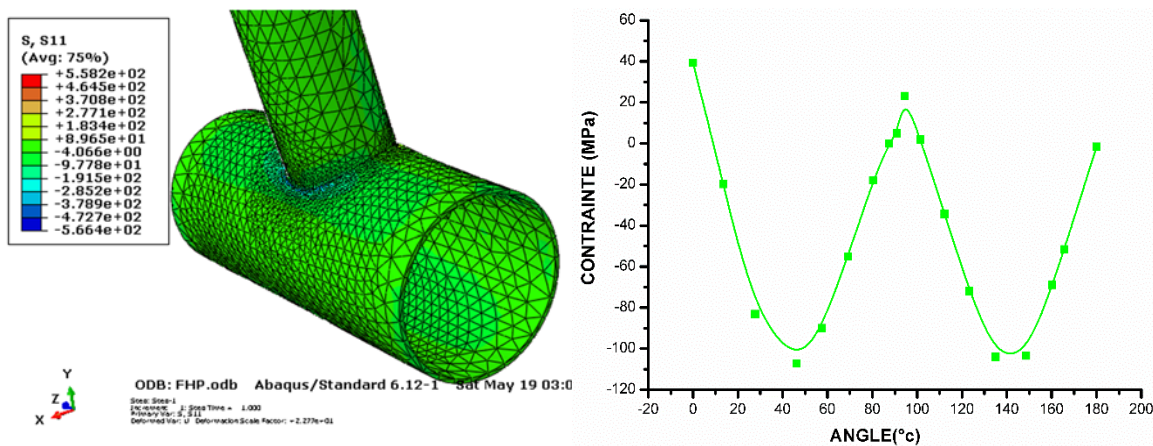


Figure II .26: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{xx}$

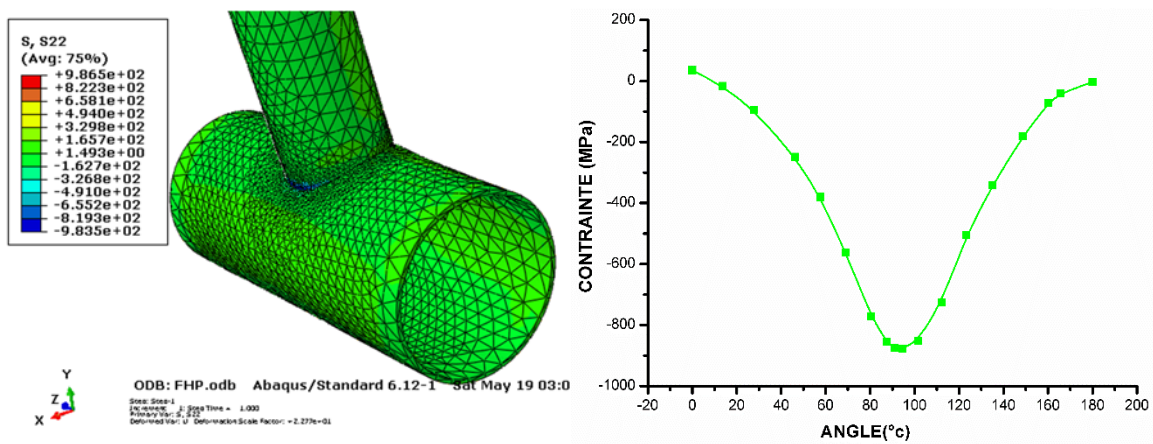


Figure II .27: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{yy}$

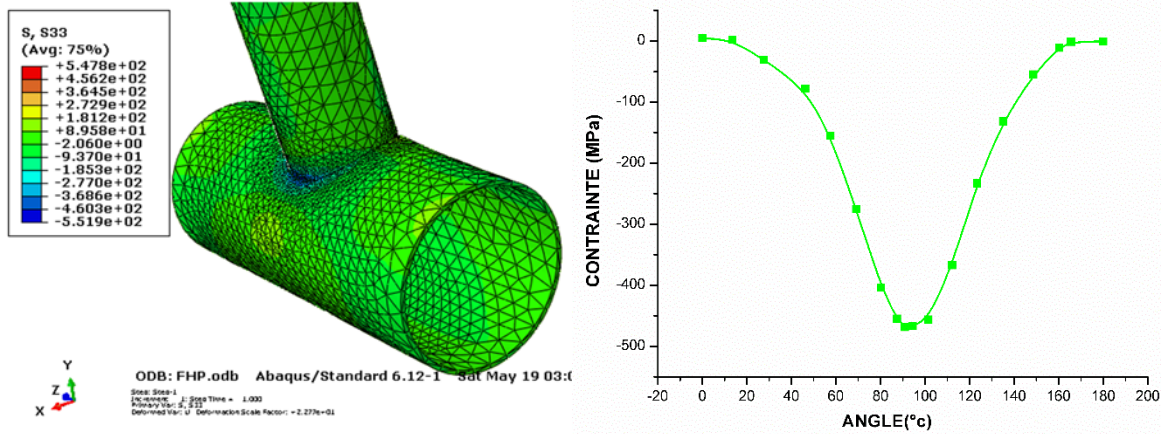


Figure II.28: Distribution des contraintes normale  $\sigma_{zz}$

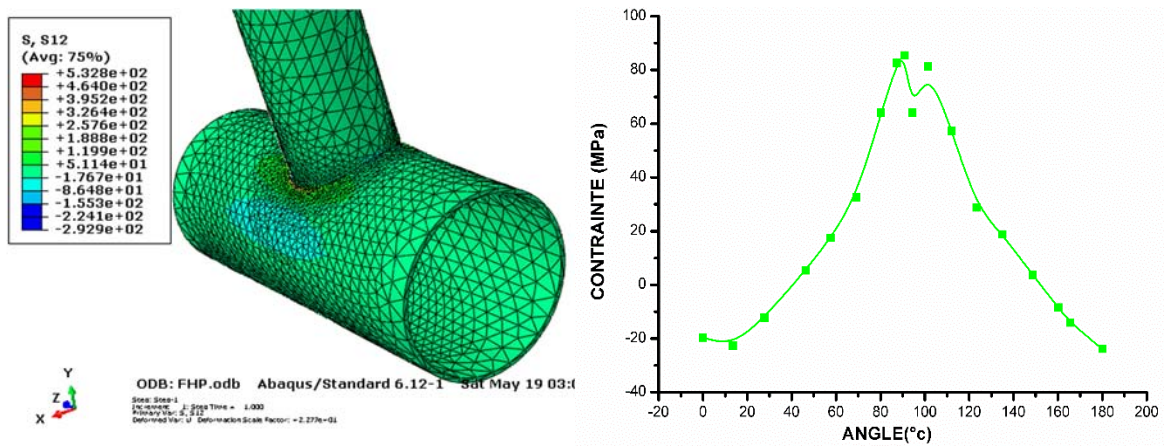


Figure II.29: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xy}$

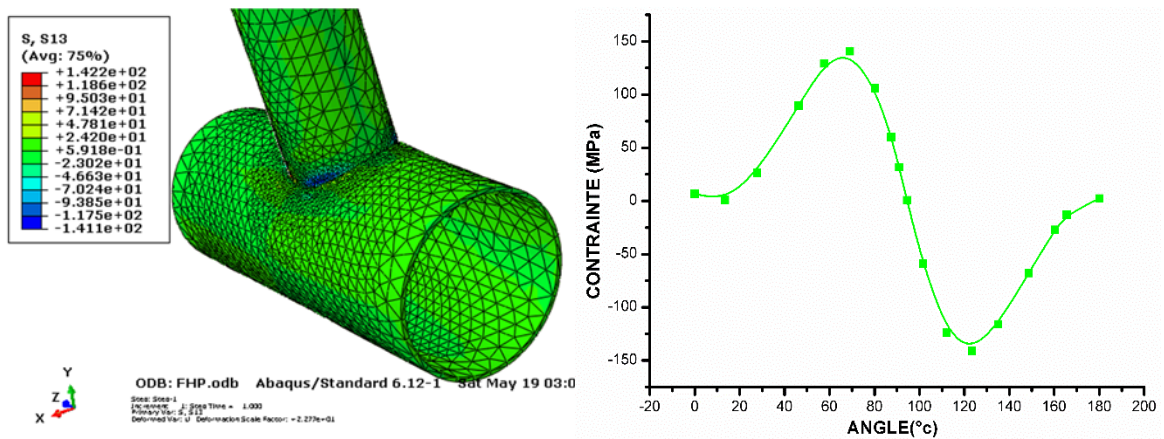


Figure II.30: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{xz}$

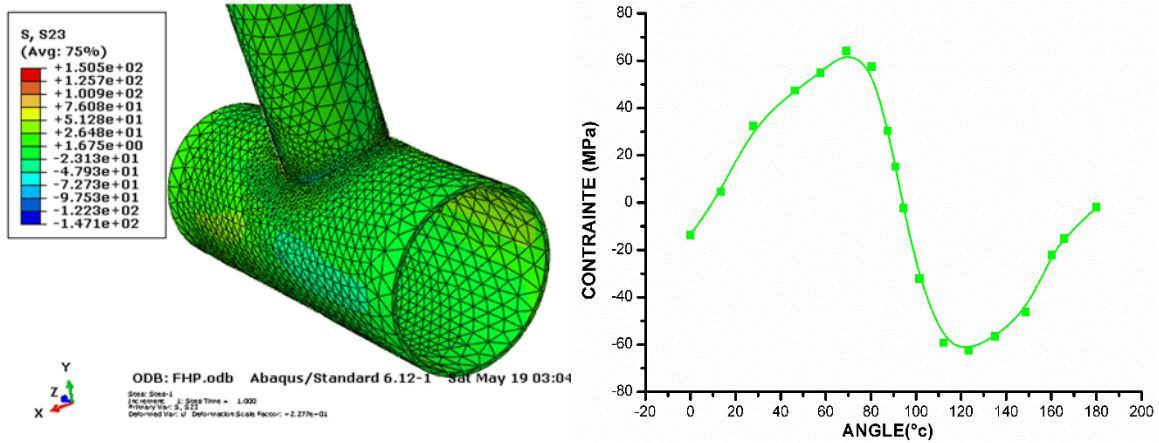


Figure II.31: Distribution des contraintes tangentielle  $\sigma_{yz}$

### II.10. Conclusion

D’après le tableau suivant et les figures précédentes et les graphes, nous avons constaté que les variations des types de chargement (traction, flexion dans le plan FDH et la flexion hors de plan FHP) aune influence sur l’allure des courbes des contraintes de Von Mises, et sur les valeurs maximales et minimales de ces contraintes. et même pour l’allure et les valeurs des contraintes tangentiels et normales

| CHARGEMENT           | σ <sub>VM</sub>       | σ <sub>11</sub>       |                       | σ <sub>22</sub>        |                       | σ <sub>33</sub>        |                       | σ <sub>12</sub>        |                       | σ <sub>13</sub>        |                       | σ <sub>23</sub>        |                       |           |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
|                      |                       | MAX                   | MIN                   | MAX                    | MIN                   | MAX                    | MIN                   | MAX                    | MIN                   | MAX                    | MIN                   | MAX                    | MIN                   |           |
| TRACTION             | 1,035.10 <sup>2</sup> | 8,09.10 <sup>2</sup>  | 6,417.10              | -4,350.10              | 1,273.10 <sup>2</sup> | -6,850.10              | 7,033.10              | -3,660.10              | 5,712.10              | -5,944.10              | 2,082.10              | -2,038.10              | 2,365.10              | -1,737.10 |
| FLEXION DANS LE PLAN | 4,681.10 <sup>2</sup> | 1,439.10 <sup>1</sup> | 3,573.10 <sup>2</sup> | -4,261.10 <sup>2</sup> | 4,273.10 <sup>2</sup> | -4,336.10 <sup>2</sup> | 4,182.10 <sup>2</sup> | -5,259.10 <sup>2</sup> | 1,731.10 <sup>2</sup> | -1,72.10 <sup>2</sup>  | 1,383.10 <sup>2</sup> | -1,388.10 <sup>2</sup> | 1,25.10 <sup>2</sup>  | -2,27     |
| FDP                  |                       |                       |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |           |
| FLEXION HORS DE PLAN | 9,338.10 <sup>2</sup> | 1,234                 | 5,582.10 <sup>2</sup> | -5,664.10 <sup>2</sup> | 9,865.10 <sup>2</sup> | -9,835.10 <sup>2</sup> | 5,478.10 <sup>2</sup> | -5,519.10 <sup>2</sup> | 5,328.10 <sup>2</sup> | -2,929.10 <sup>2</sup> | 1,422.10 <sup>2</sup> | -1,411.10 <sup>2</sup> | 1,505.10 <sup>2</sup> | -1,47     |
| FHP                  |                       |                       |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |                        |                       |           |

Tableau II.3 : Résultat des Contrainte

**RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **HADJOUI FÉTHI**, « Thème Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades », Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2012-2013.
- [2] **MANSOURI KHELIFA**, thèse magister « modélisation des structures tubulaire aux jonctions soudées en acier », centre universitaire Abbes Laghrour Khenchela, en 2010
- [3] **ABDELMOUMENE GUEDRI**, thèse doctorat «Conception et simulation numérique des caractéristiques mécaniques des pipelines », université BADJI MOKHTAR Annaba Année 2008.
- [4] **M.D. HERYNK, S. KYRIAKIDES, A. ONOUFRIOU, H.D. YUN**, « Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure » , International Journal of Mechanical Sciences, 2006.
- [5] **JULIEN CAPELLE**, Thèse de doctorat « Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumise à une pression d'hydrogène », Université Paul Verlaine de Metz, Soutenue le 4 Novembre 2008.
- [6] **SAID BENZAADA**, « Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes».
- [7] **TEBBAKH BACHIR**, Thèse doctorat « Analyse Expérimentale de la Connexion Acier-Béton dans les Structures Mixtes », Université Mentouri Constantine en 2011.
- [8] **SAID .BENZAADA**, « technologie deuxième partie », office des publications universitaires.
- [9] **EMILIE LE GUEN**, thèse doctorat « Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle3D thermique », Université BRETAGNE-SUD, 4 Novembre 2010.
- [10] **G.ARBIDE AND M. CORET**, «Study of tearing of metals from the damage initiation to the final rupture EC-Nantes, GeM UMR 6183 -S355 Tensile Test REPORT-G ». centrale Nantes – Juin 26, 2014.
- [11] Les aciers de construction -NLMK - Europe strip Products, La Louvière - BELGIQUE
- [12] **BOULALI FARES et SIAD FARID**, Mémoire master «Contrôle destructif et non destructif des tubes en acier soudés par induction à haute fréquence », université d'Abbès Laghrour Khenchela, le 23/06/2014

## RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] **DR. TOUALBIA DJAMEL**, « Cours de soudage et rechargement », Université Mohamed Cherif Massaada Souk Ahras. MEMOTECH, « le soudage donné pratiques pour l'apprentissage ».
- [14] **MEMOTECH**, « le soudage donné pratiques pour l'apprentissage ».
- [15] **HENRI WALASZEK**, « Les nouvelles techniques de contrôle non destructif: un atout pour votre entreprise », Lundi de la mécanique, 8 avril 2013, CEA Cadarache, CETIM.
- [16] **S. JALALA, Z. EL MASKAOUIB, L. BOUSSHINEc, A. EL MALIKId**  
Comportement mécanique des jonctions tubulaires soudées de forme DT : Etude comparative des jonctions percées et non percées
- [17] **Mohamad Fathi GHANAMEH**, DOCTEUR «Etude numérique et expérimentale des jonctions tubulaires soudées "des plateformes offshore" soumises à des sollicitations complexes « *Analyse par Contrôle non destructif* » » L'UNIVERSITE PAUL VERLAINE de METZ 2007
- [18] **Bellagh kamel**, Calcul du facteur de concentration de contraintes dans les jonctions tubulaires soudées soumises à des chargements combinés
- [19] **KLAS WEMAN**, « Procédé du soudage » Dunod, Paris, 2012 ISBN 978-2-10-057810-8
- [20] **HANIFA–MAROUF**, mémoire magister « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier ordinaire E36/Acier anti-usure NAXTRA76 », utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.

# **CONCLUSION GENERALE**

### **Conclusion**

Les intersections des jonctions tubulaires soudées représentent des discontinuités structurales et des contraintes résiduelles conduisant à des zones de fortes concentrations de contraintes au voisinage des cordons de soudure..

Les chargements répétés dans le temps (houle, courant, marées, vents) donnent lieu à un grand nombre de cycles de contraintes d'amplitudes variables. La combinaison de ces cycles de chargements et des zones de fortes concentrations de contraintes conduit inévitablement à un endommagement par fatigue de ces structures ; surtout s'il existe des défauts de soudage. Les conditions de soudage, le type de joint soudé et la géométrie de la soudure conditionnent la tenue en fatigue des assemblages. Il importe donc, pour le dimensionnement en fatigue de ces structures, de connaître l'emplacement des points où la contrainte est maximale (points chauds).

L'utilisation du code calcul Comsol multiphysics basé sur la méthode des éléments finis permet d'étudier et de prévoir le comportement de la structure tubulaire soudée en forme de T. Une modélisation simple et précise de ce logiciel. Permet de calculer la concentration de contraintes (les facteurs de concentration de contraintes) au voisinage du cordon de soudure et également de localiser les points chauds ou zones de fortes concentrations de contraintes. Vue la complexité et la discontinuité géométrique des nœuds tubulaires, Cette méthode paraît la mieux adaptée.

**Résumé :**

L'objectif de ce travail est d'étudier la distribution des contraintes quasi-soudées par le facteur de contrainte dans la structure en forme de T, qui présente une résistance à la traction, une flexion dans le niveau et une flexion hors du niveau afin de déterminer la plus grande valeur de Von Mises.

**Summary:**

The objective of this work is to study the distribution of near-weld stresses by the stress factor in the T-shaped tube structure, which exhibits tensile strength, curvature within the level, and curvature outside the level in order to determine the greatest value of Von mise

**ملخص :**

الهدف من هذا العمل هو دراسة توزيع الاجهادات قرب اللحام عن طريق عامل تركيز الاجهادات في بنية الأنبوب على شكل حرف T المعرض لقوى الشد و انحناء داخل المستوى و انحناء خارج المستوى من اجل معرفة اكبر قيمة ل Von mises