

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MÉMOIRE

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

INTITULÉ

Caractérisation du matériau des tubes de la TSS et simulation du comportement à la pression

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPECIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PRÉSENTE PAR : BOULAKSA MERIEM

DIRECTEUR DE MÉMOIRE :	Pr. BOUSSAID. O	(Pr)
PRÉSIDENT :	Pr. KHELIF. R	(Pr)
EXAMINATEURS :	Dr. MERABTINE. A	(MCB)
	Mr. TOUATI. R	(MAA)

ANNÉE : 2018 / 2019

Dédicace

À toi ma chère mère je dédie ce travail pour le quel tu as consenti tant sacrifice.

À toi mon chère père pour ton aide et ton soutien

À mes sœurs : Zahra, Amel

À mes frères : Khair-Eddine, Ahecn, Theb, Tyed

À mes très chères amies pour leur encouragement : Ahmed-Zakaria-Aiss, Aouabdi Hadjer, Halla, Chaiema, Roumaissa, Manel, Selma, Lilia, Bouchra

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis

Merci

Boulaksa Meriem

Remerciement

Avant tout, je remercie Dieu qui m'a fournis de la patience au moment de besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté contre le désespoir.

Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien permanent, constant et surtout sans aucune faille ; avec la patience et la confiance que vous avez toujours placée en moi, vous m'avez permis d'avancer en tout quiétude .J'espère qu'ils trouveront en ce modeste travail une récompense de ce qu'ils ont fait pour moi.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur Pr Boussaid Ouzine qui m'a bien orienter, guider et aider au cours de la préparation de ce travail.

Je remercie aussi les membres de l'équipe de TSS Sider, surtout : Aissaoui Ahmed Zakaria pour m'avoir aidé à accomplir mon stage pratique avec les meilleures conditions requises.

Je n'oublie pas de remercier l'ensemble du personnel du laboratoire d'essai surtout : Mr Adhane Rahim, Mr Sahnoune Badri pour leurs aides et leurs gentillesse au cours de stage.

Et je remercie également Ghenai Walid de m'avoir aidé

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements à ceux qui m'ont encouragé et participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Boulaksa Meriem

Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciments.....	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux.....	v
Résumé.....	vi
Introduction générale	1

Chapitre I : Étude bibliographique

I.1. Introduction	2
I.2. Caractéristiques des tubes	2
I.3. Caractéristiques et choix des matériaux	4
I.3.1. Propriétés mécaniques des matériaux	4
I.3.1.1 Propriétés d'usage	5
I.3.1.2 Essai de Traction	6
I.3.1.3 Re, Rm, Re0, 2	7
I.3.1.4 Courbe vraie ou rationnelle	8
I.3.1.5 Pallier de limite élastique	8
I.3.1.6 Autres caractéristiques mécaniques	9
I.3.1.6-1 l'allongement à la rupture A.....	9
I.3.1.6-2 Le module de Young E	9
I.3.1.6-3 Le coefficient de Poisson ν	10
I.3.1.6-4 Module de cisaillement c	10
I.3.3. Étude de la rupture.....	10
I.3.3.1. Les différents types de rupture	11
I.3.3.1.1. La rupture fragile.....	11
I.3.3.1.2 La rupture ductile.....	13
I.3.4. Matériaux utilisés dans la fabrication des tubes	14
I.3.4.1. Introduction	14
I.3.4.2. Les aciers	14
I.3.4.3. Composition des aciers	16
I.3.4.4. Les aciers recommandés pour les tubes	16

Chapitre II : Analyse du processus de production des tubes

II.1. Introduction	17
II.2. Analyse cinématique du processus de fabrication	17
II.2.1. Zone préparation des lingots	18
II.2.2 Zone préparation des ébauches	19
II.2.3 Zone de laminage au laminoir pèlerin	23
II.2.4 Zone calibrage ($\varnothing > 5''$)	25
II.2.5 Zone Réduction	26
III.2.5.1. Description	27
II.3. Analyse dynamique du processus de fabrication.....	28
II.3.1. Étude des efforts au laminoir oblique	28
II.3.2 Étude des efforts au laminoir à pas de pèlerin	30
II.3.3 Étude des efforts au laminoir Réducteur-Étireur.....	30

Chapitre III : Étude expérimentale

III.1. L'Essai de traction	32
III.1.1. Introduction.....	32
III.1.2. Caractéristiques nominales	32
III.2. - Laboratoire des essais mécaniques a l'AMPTA.....	35
III.3. Types d'essais réalisés dans le laboratoire d'AMPTA.....	35
III.4. Étude expérimentale	35
III.4.1. Propriétés mécaniques du matériau.....	35
III.4.2 - Analyse chimique.....	36
III.5. Conduite de l'essai de traction	36
III.5.1. Détermination des propriétés mécaniques	36
III.5.2. Géométrie de l'éprouvette de traction.....	37
III.5.3. Machine d'essai de traction	38
III.5.4. Résultats de l'essai de traction.....	39
III.6. Résultats des essais de traction et Discussions	40
III.7. Numérisation des courbes à l'aide des Logiciels Digitizer et OriginLab	40
III.7.1. Introduction	41
III.7.2. Conclusion	45

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV.1 Introduction	46
IV.2 Caractéristiques du logiciel de simulation.....	46
IV.3 Concept de la simulation	48
IV.4 Exploration des Résultats	49
IV.4.1 Résultats de la simulation	50
IV.4.2 Calcul de la Longueur et de l'épaisseur de l'élément en fin de déformation	51
IV.4.3. Conclusion	53
Conclusion	54
Références	

Liste des Figures

Figure 1 : Caractéristiques des tubes.....	3
Figure 2 : Courbe de traction	6
Figure 3 : Courbe de traction avant striction pour des aciers inoxydables	7
Figure 4 : Courbe vraie ou rationnelle	8
Figure 5 : Courbe de traction brute du polycarbonate à 20°C d'après les référentiels Dunod.....	8
Figure 6 : Courbe contrainte déformation classique.	11
Figure 7 : Rupture fragile.....	12
Figure 8 : Rupture ductile.....	12
Figure 9 : Courbe contrainte déformation dans le cas des ruptures fragile et ductile.....	12
Figure 10 : Évolution de la résilience en fonction de la température.....	13
Figure 11 : pars des lingots.....	19
Figure 12 : Four a sole (lingot au 1300°C).....	19
Figure 13 : Presse à percer de (800-1200) tonnes.....	20
Figure 14 : Four a plateau.....	21
Figure 15 : Inclinaison et pas d'avance des cylindres en fonction du diamètre de l'ébauche.....	22
Figure 16 : Laminoir oblique.....	22
Figure 17 : Phases de transformation de l'ébauche, au cours du perçage au laminoir oblique.....	22
Figure 18 : Emprise de l'ébauche entre le mandrin de perçage et les cylindres obliques d'une part et les guides inférieur et supérieur d'autre part.....	23
Figure 19 : Emprise de l'ébauche au laminoir à pas de pèlerin.....	23
Figure 20 : Représentation de la cannelure du cylindre du laminoir à pas de pèlerin.....	24
Figure 21 : Principe du laminage au laminoir pèlerin.....	24
Figure 22 : Calibreur.....	25
Figure 23 : Décomposition des efforts au laminoir oblique.....	28
Figure 24 : Répartition des efforts d'écrasement de l'ébauche au laminoir oblique.....	29
Figure 25 : Répartition des efforts au cours d'un cycle du laminage.....	30
Figure 26 : Efforts au laminoir réducteur étireur.....	31
Figure 27 : Courbe contrainte vraie en fonction de la déformation vraie	34
Figure 28 : Laboratoire des essais mécaniques d'AMPTA.....	35
Figure 29 : Spectromètre (type SPECTRLAB).....	36
Figure 30 : Méthode de prélèvement des éprouvettes de traction.....	37

Figure 31 : Dessin et dimension d'éprouvette en 3D sur SolidWorks	37
Figure 32 : Languette et Éprouvette plate de traction de l'acier API-X52.....	37
Figure 33 : Machine de traction universelle De type Z1200 ZWICK/ROELL.....	38
Figure 34 : les outils de machine Z1200 ZWICK/ROELL.....	38
Figure 35 : Courbes Contrainte-Déformation des 2 Échantillons prélevés du tube.....	39
Figure 36 : Courbe conventionnelle retrouvée à partir des données TSS.....	41
Figure 37 : Courbe conventionnelle donnée par la TSS, numérisée sur OrigineLab.....	41
Figure 38 : Courbe contrainte déformation vraie calculée à partir des données TSS.....	42
Figure 39 : Courbe contrainte déformation vraie numérisée.....	42
Figure 40 : Comparaison courbe nominale donnée par la TSS et courbe nominale numérisée.....	43
Figure 41 : Comparaison de la courbe vraie TSS avec la courbe vraie numérisée.....	43
Figure 42 : Comparaison de la courbe vraie avec la courbe nominale à partir des données fournies par la TSS.....	44
Figure 43 : Comparaison de la courbe vraie avec la courbe nominale obtenue par numérisation	44
Figure 44 : Dessin de définition du tube.....	48
Figure 45 : Surface d'application de la pression.....	49
Figure 46 : Maillage du tube en CD8R	49
Figure 47 : Répartition des contraintes sur l'épaisseur du tube.....	49
Figure 48 : Répartition de déformations plastiques sur l'épaisseur du tube.....	50
Figure 49 : Choix des éléments concernés par la déformation PE11 sur la section.....	50
Figure 50 : Répartition de la déformation Plastique le long du tube.....	51
Figure 51 : Répartition de la déformation plastique sur la section du tube.....	51
Figure 52 : État du tube au moment de la première de déformation.....	52
Figure 53 : État du tube au moment de la deuxième de déformation.....	52
Figure 54 : État du tube au moment de la 3e de déformation.....	52
Figure 55 : État du tube au moment de la déformation à la rupture.....	53

Liste des Tableaux

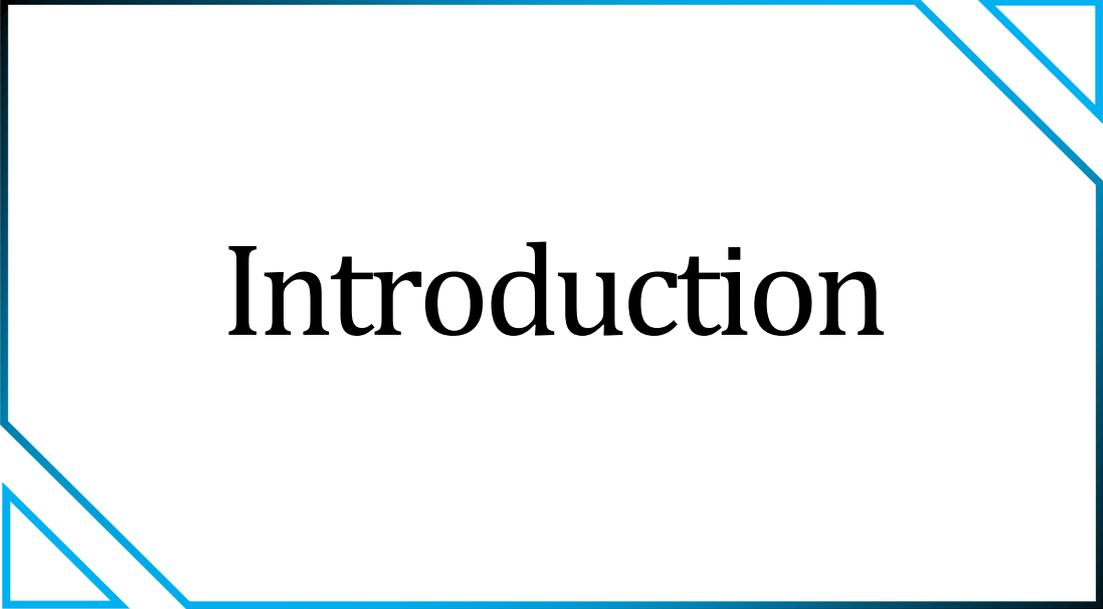
Tableau 1 : Variation des dimensions de l'ébauche au cours du laminage.....	26
Tableau 2 : Les différentes étapes de transformation du tube Ø 70 au cours du laminage.....	27
Tableau 3 : Propriétés mécaniques de l'acier API 5L Grade B, X52.....	35
Tableau 4 : La composition chimique pour l'acier API 5L grade B, X52.....	36
Tableau 5 : PV de traction	39
Tableau 6 : Résultats de traction.....	39

Résumé

Dans le cadre de mon projet de fin d'études ; un sujet de recherche m'a été proposé en relation avec le stage effectué à la TSS Ensider ; au laboratoire des essais mécaniques. Le sujet porte sur la caractérisation des tubes sans soudures de matériau X52. Les essais effectués au laboratoire ont permis de la détermination des courbes fournies par la TSS; à partir de la courbe conventionnelle Force-Déplacement dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS ; à partir desquelles des courbes Contraintes déformations rationnelles ont été déduites. Les courbes retrouvées confirme le comportement élastoplastique du matériau et les limites de la déformation plastique jusqu'à rupture.

Le logiciel Abaqus, permettant la variation des paramètres opérationnels et la variation des critères pouvant agir sur l'apparition de certaines irrégularités dans les tubes, a permis de recueillir des résultats plus variés que les démarches expérimentales. La simulation d'un tube sous pression réalisée sur le logiciel abaqus tenant compte des conditions de service a permis d'établir le comportement du tube aux différentes sollicitations et une caractérisation du matériau.

La simulation a concerné un morceau de tube sur lequel est appliquée une pression hydrostatique intérieure ; ce qui a permis de tester la résistance du tube et la répartition des contraintes et des déformations qui peuvent entraîner une rupture. Le modèle de simulation a permis de déduire l'évolution de l'épaisseur au fur et à mesure de l'augmentation de la pression.



Introduction

Introduction :

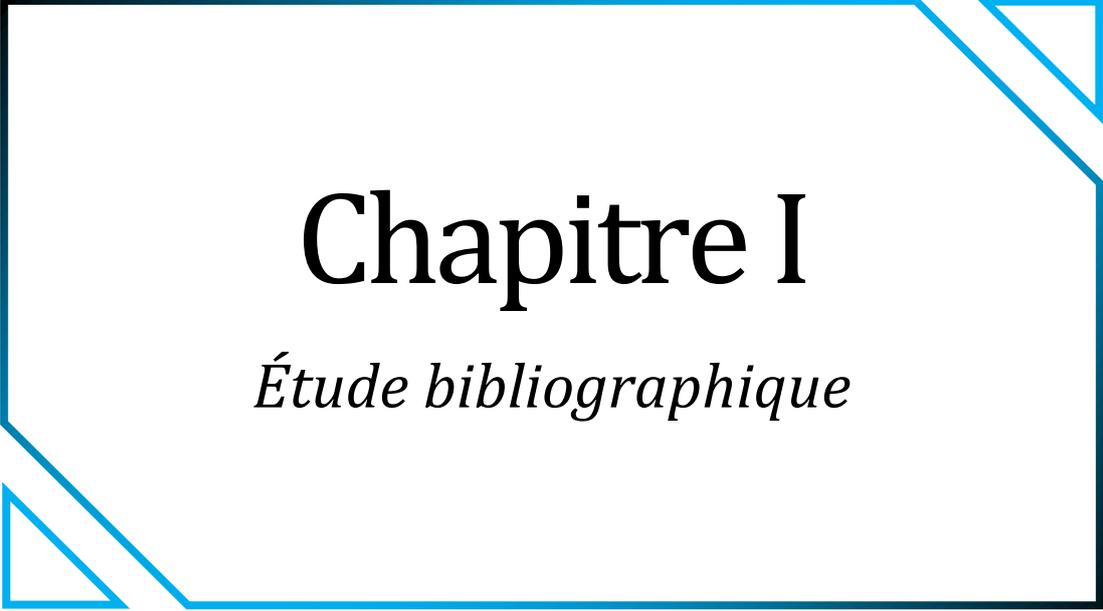
Le transport des hydrocarbures par canalisation reste le moyen le plus économique et le plus sûr pour les sociétés de transport de ces hydrocarbures. Les fortes demandes énergétiques mondiales nécessitent d'élever le débit des réseaux de distribution en augmentant soit la pression de service, soit les diamètres des canalisations ou bien les deux. Ainsi, l'installation de nouveaux réseaux nécessite une augmentation de la résistance des conduites dont les caractéristiques mécaniques et chimiques doivent être améliorées. Par contre pour les réseaux existants, il n'existe pas d'opportunités de les remplacer mais plutôt de les fiabiliser après plusieurs années de service. Différentes nuances d'aciers sont utilisées pour fabriquer les tubes pour la pose des pipelines. Des réseaux de transports des hydrocarbures sont composés d'une dizaine de nuances différentes, tout en sachant que la nuance X52 et X60 fabriqués à l'Ensider représentent 70% de la diversité de ces réseaux.

Différentes techniques de fabrication de tubes ont été employées. La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement, avec le temps, de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité des réseaux de distribution des hydrocarbures. On y trouve des tubes non soudés, des tubes soudés en spirale, des tubes soudés longitudinalement.

Le présent travail propose une analyse des caractéristiques mécaniques d'un acier pour tube destiné pour la fabrication de gazoduc. Il vient en complément d'un stage de fin d'études, réalisé au niveau de l'unité de production des tubes Aciers sans soudures d'Arcelor Mittal.

La fabrication des tubes sans soudure est obtenue par laminage. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines. Dans le laminage à chaud, la température du matériau est choisie de façon à obtenir les caractéristiques plastiques optimales. Les tubes laminés sans soudure sont obtenus par laminage à chaud et sont utilisés pour les faibles diamètres jusqu'à un maximum de 16" à 24"(406.4mm à 609.6mm), selon les pays.

La simulation d'un tube sous pression réalisée sur le logiciel abaqus tenant compte des conditions de service permet d'établir le comportement du matériau aux différentes sollicitations et une caractérisation du matériau. Le logiciel Abaqus, permettant la variation des paramètres opérationnels et la variation des critères pouvant agir sur l'apparition de certaines irrégularités dans les tubes, conduit à des résultats plus variés que les démarches expérimentales.



Chapitre I

Étude bibliographique

I.1. Introduction :

Depuis l'extension des hydrocarbures, les aciers sont les plus utilisés pour la fabrication des canalisations destinées à les transporter. L'une des exigences du cahier des charges que doit remplir un bon acier pour gazoducs est la réconciliation des propriétés d'emploi aussi diverses qu'une limite d'élasticité maximale, une bonne ténacité, aussi qu'une nécessaire soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût de revient. Cependant ces canalisations souffrent toujours des avaries qui peuvent causer des risques pour les vies humaines et l'environnement écologique associés à des pertes d'exploitation avec souvent un préjudice financier. L'examen des incidents sur tuyauteries montre que dans un certain nombre de situation, les méthodes traditionnelles de calcul de résistance ne permettent pas un dimensionnement fiable. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitation des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation de fissures superficielles ou traversantes suivies de fuites d'où la nécessité de prendre en compte simultanément les paramètres de la mécanique de la rupture. En outre, il convient de considérer les différentes étapes du développement de la fissuration qui conduira à une rupture finale : amorçage, croissance sous critique puis critique.

Dans un calcul traditionnel de résistance des matériaux, la situation du point de vue mécanique est considérée comme acceptable si la contrainte de sollicitation équivalente n'excède pas la valeur de la contrainte admissible. Celle-ci est définie le plus souvent à partir de la résistance ultime ou la limite d'élasticité divisée par un coefficient de sécurité. Dans la pratique, le dimensionnement des canalisations est plus complexe car il doit se faire selon des codes qui impose le formalisme des calculs associés à ce dimensionnement notamment en précisant la définition des contraintes admissibles et des épaisseurs de paroi réglementaires pour se prémunir des risques d'érosion ou de corrosion. Les normes et codes relatifs à ce type de structure ont beaucoup évolué au cours du temps en incorporant les progrès des connaissances sur les critères de résistance des structures, les améliorations des propriétés mécaniques des matériaux, les exigences accrues sur les pressions et températures de fonctionnement.

I.2. Caractéristiques des tubes :

La plupart des pipelines sont réalisés avec l'acier, bien que le plastique et l'aluminium sont parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier sont fabriqués 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.

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. (Figure 1)

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. [1]

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.

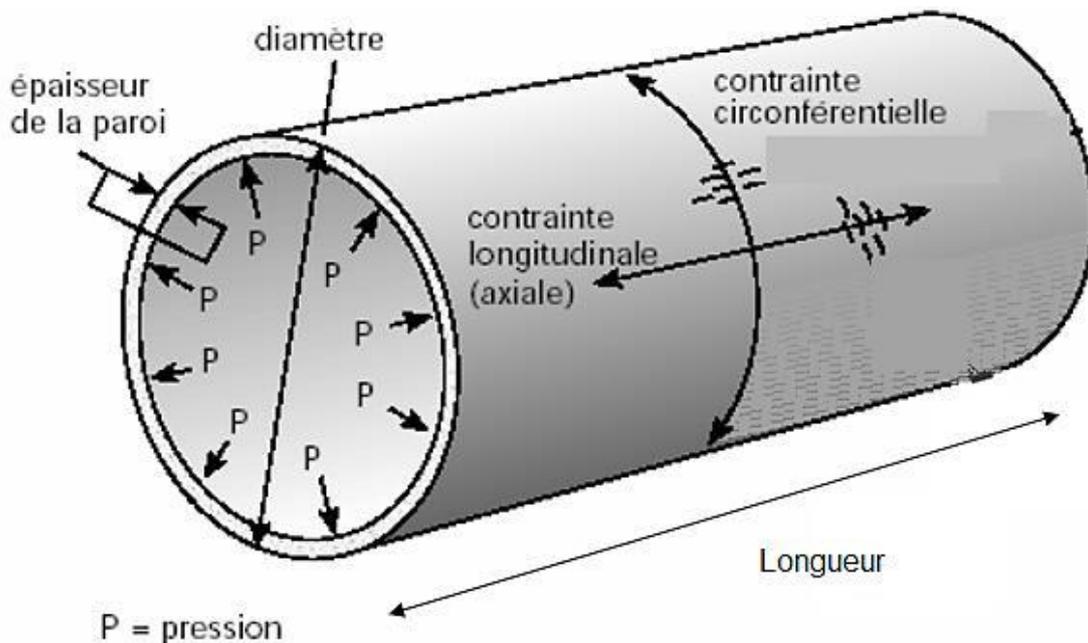


Figure 1 : Caractéristiques des tubes

Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation.

Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menés à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses).

I.3. Caractéristiques et choix des matériaux

Le BE de mécanique est confronté au problème du choix des matériaux dans le respect des contraintes imposées par le cahier des charges.

L'objectif de ces pages est de faciliter ce choix et les calculs de prédétermination pour les matériaux courants en donnant les caractéristiques physiques et mécaniques (E , ν , R_e , $A\%$..).

Les caractéristiques thermiques (C_p , λ , T_{max} ...) ne sont généralement pas indiquées ici. Il est possible de les trouver sur le site de l'IUSTI (<http://iusti.univ-mrs.fr>).

Les explications, les définitions et rappels, ont pour but de permettre une meilleure compréhension des phénomènes et des incertitudes liées aux valeurs données. En effet, les caractéristiques dépendent de la nature du matériau (métal, polymère, composite, céramique), de sa composition et de sa structure. La structure microscopique est liée aux conditions d'élaboration et aux traitements thermomécaniques effectués lors de la fabrication [2].

I.3.1. Propriétés mécaniques des matériaux

Le comportement d'un métal est fonction des forces extérieures appliquées et traduit les évolutions de la cohésion de l'édifice cristallin. Pour les métaux, les forces qui assurent cette cohésion résultent de l'ionisation des atomes du métal qui perdent des électrons de valence et circulent entre les ions.

Les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation.

Elles sont déterminées, avec un certain intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés. [3]

I.3.1.1 Propriétés d'usage :

Elles peuvent être séparées en deux catégories :

- Celles qui font l'objet d'une garantie : R_m , R_e , A , à 20°C, ou la limite élastique à chaud R_p^t , la résilience à température donnée K_c .
- Celles données à titre indicatif : résistance au fluage (allongement donné, de 0,5 ou 1% à température donnée, en un temps donné : 10000 ou 100000 heures), à la fatigue (limite d'endurance dépendant de nombreux facteurs pour 10^7 cycles pour les aciers)

Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes normalisées prélevées dans les matériaux à tester. Les conditions de prélèvement et d'essais sont définies par les normes.

I.3.1.2 Essai de Traction :

L'essai de traction est l'un des plus utilisés pour caractériser le comportement mécanique statique d'un matériau. Il est simple de mise en œuvre et il permet d'accéder à des paramètres particulièrement importants, très largement utilisés dans la communauté académique et industrielle pour qualifier les matériaux.

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de :

- * déterminer le comportement élastique d'un matériau.
- * mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau.

Certains objets manufacturés doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. L'essai de traction permet de caractériser les matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou la performance d'un assemblage mécanique. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisables et reproductibles.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. Une variante moderne des essais de traction consiste à utiliser la force centrifuge sur un assemblage pour générer une contrainte de traction. Lorsque la valeur limite de résistance à la traction

La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène : si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.

Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparait.

En D il y a rupture de l'éprouvette.

I.3.1.3 Re, Rm, Re0, 2 :

Re (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. Re correspond au seuil d'écoulement plastique.

Rm est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue (**Figure 2**).

Re est atteint quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité **Re0, 2** qui correspond à un allongement plastique de 0,2% (voir Figure 2).

Les aciers austénitiques ont une limite élastique plus faible qui conduit en pratique à utiliser Re0, 2.

Dans le cas des aciers ferritiques recuits, les interactions carbone - dislocations peuvent induire une anomalie de limite d'élasticité (crochet : voir Figure 3) [2].

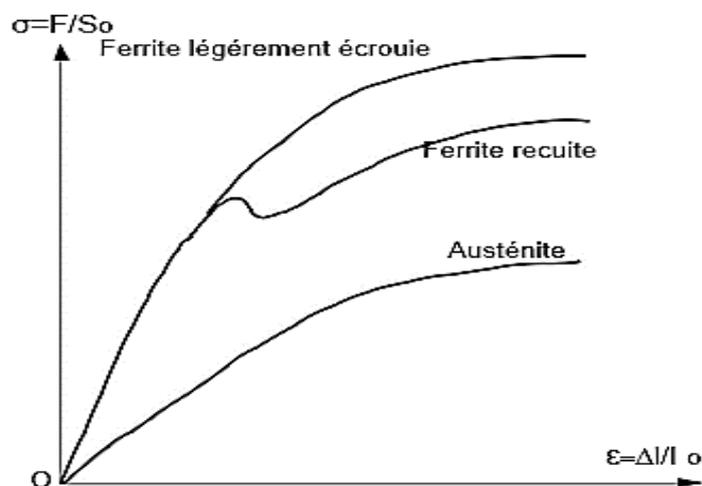


Figure 3 : Courbe de traction avant striction pour des aciers inoxydables

I.3.1.4 Courbe vraie ou rationnelle :

Dans la réalité, la section varie à chaque instant et s'éloigne de sa valeur initiale. Il en va de même pour l'allongement relatif réel.

On peut tracer la courbe de traction vraie, ou rationnelle, qui utilise les sections et déformations réelles à chaque instant et met en évidence le durcissement du matériau (écrouissage) au cours de la déformation plastique.

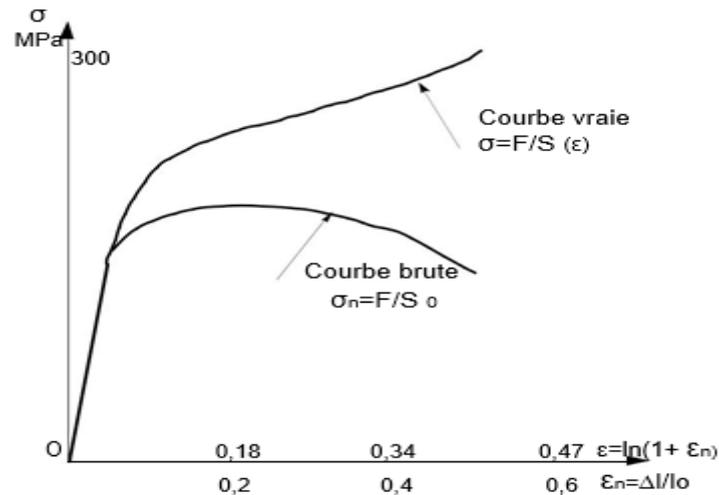


Figure 4 : courbe vraie ou rationnelle

I.3.1.5 Pallier de limite élastique :

La courbe brute « conventionnelle » de certains matériaux tels le polycarbonate ou l'acier doux recuit montrent à la fin du domaine élastique une chute des contraintes suivie d'un palier qui correspond à une déformation plastique locale qui se propage sous effort constant.

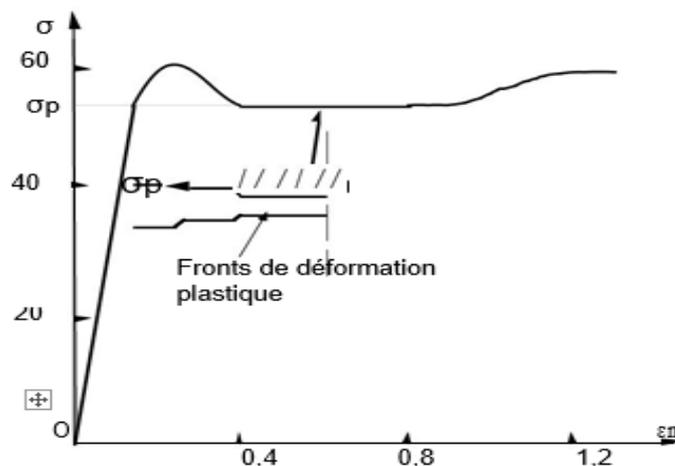


Figure 5 : Courbe de traction brute du polycarbonate à 20°C d'après les référentiels Dunod

I.3.1.6 Autres caractéristiques mécaniques :

I.3.1.6-1 : l'allongement à la rupture A

L'allongement à la rupture est le rapport $A = 100 \cdot (l_d - l_0) / l_0$

Où l_d est la longueur de l'éprouvette à la rupture au point D.

I.3.1.6-2 Le module de Young E ::

La pente de la partie linéaire OA (Figure 2) représente le module d'Young E (en MPa ou en GPa) ou module d'élasticité.

On appelle loi de Hooke la relation $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

La mesure de E est obtenue à l'aide d'un extensomètre.

Le module de Young à 20°C va de 4 MPa pour le caoutchouc à 500 GPa pour les céramiques (SiC). Cette variation importante est due aux intensités très variables des forces de liaison entre les atomes ou molécules au sein des matériaux : liaisons covalentes, ioniques.

La rigidité d'une structure en traction, compression, flexion, est proportionnelle au module d'Young. [2]

La valeur de ce dernier, pour les matériaux isotropes, est indépendante de la direction de l'effort. Par contre, pour les matériaux anisotropes, tels les stratifiés, les composites orientés, les monocristaux, E varie avec l'orientation.

E décroît quand la température augmente : environ 10^{-4} par degré pour les métaux, les céramiques et les verres. Il varie de façon beaucoup plus importante en fonction de la température dans le cas des polymères et des composites à matrice organique. [2]

Valeur spécifique du module :

Il est intéressant d'utiliser le rapport du module et de la densité du métal. La valeur de E/ρ est la valeur spécifique du module : c'est un indice de performance qui tient compte de la déformation élastique et de l'allègement.

Les métaux peuvent être classés en deux catégories :

- aluminium, fer, magnésium, titane (les plus performants) $26 < E/\rho < 27$ (en $10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{Kg}^{-1}$)

- cuivre et zinc (les moins performants) $14 < E/\rho < 15$. [2]

I.3.1.6-3 Le coefficient de Poisson ν :

L'éprouvette subit aussi des déformations latérales : le coefficient de Poisson, ou coefficient de contraction latérale dans le domaine élastique est le rapport sans dimension

$$\nu = (d_0 - d) / d_0$$

Ce coefficient, compris selon les matériaux entre 10^{-2} et 4×10^{-1} , dépend légèrement de la température. [2]

I.3.1.6-4 module de cisaillement c :

Le module de cisaillement G ou module de Lamé ou module de Coulomb, exprimé en MPa ou GPa, définit le cisaillement élastique consécutif à l'application d'une sollicitation de cisaillement.

Il varie sensiblement comme E en fonction de la température et le type de matériau. Pour les matériaux isotopes, on a la relation

I.3.3. Etude de la rupture :

D'énormes progrès ont été accomplis ces dernières décennies dans l'analyse et la modélisation des mécanismes de rupture d'un matériau. La mécanique linéaire élastique de la rupture fournit en particulier un cadre théorique qui permet de décrire la propagation des fissures. Ces prédictions sont en bon accord avec les observations expérimentales tant que le matériau considéré est suffisamment homogène et que la vitesse de rupture reste suffisamment lente (inférieure à 100 m/s). En revanche, elles échouent largement dans le cas contraire. En se propageant, le front de fissure interagit avec la microstructure du matériau et émet ainsi des ondes de contrainte de différents types (ondes acoustiques, ondes de Rayleigh, ondes de fractures,...). Celles-ci se propagent dans l'ensemble du matériau, interagissent elles-mêmes avec la microstructure et reviennent perturber la propagation du front. Ces effets restent encore largement méconnus.

I.3.3.1. Les différents types de rupture :

La courbe contrainte / déformation (Figure.9) issue, par exemple, d'essais de traction sur des éprouvettes jusqu'à la rupture, fait souvent apparaître deux zones lors de la déformation du matériau :

- Une zone élastique, dans laquelle contraintes et déformations sont liées proportionnellement. Le matériau revient à son état d'origine lorsque cesse la sollicitation.
- Une zone plastique, pour laquelle le matériau ne revient pas à son état d'origine lorsque cesse la sollicitation.

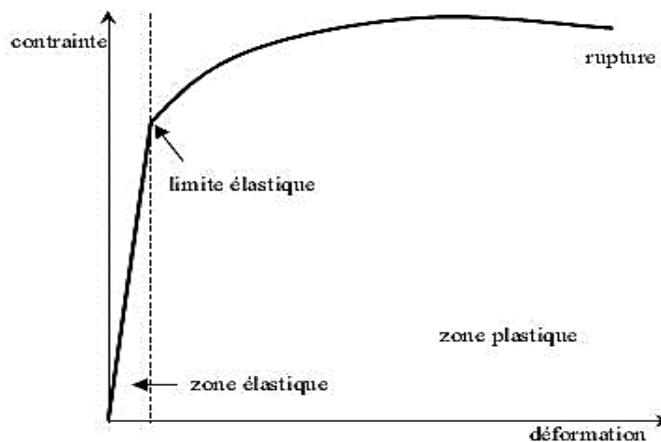


Figure 6 : Courbe contrainte déformation classique.

Au regard de la cristallographie (échelle des grains), les déformations élastiques et permanentes respectent la cohésion de la matière. De ce fait, la rupture survient lorsque cette cohésion est détruite. Elle opère par création de discontinuités surfaciques ou volumiques au sein de la matière.

Il s'agit de microfissures de l'ordre du micron, qui deviennent des macros fissures en atteignant des dimensions de l'ordre du millimètre, et enfin, des fissures, à l'échelle des structures mécaniques. Deux mécanismes de rupture locale sont décrits : la rupture fragile et la rupture ductile.

I.3.3.1.1. La rupture fragile :

La rupture fragile est caractérisée par une cassure sans déformation plastique, ou avec une déformation plastique faible (Figure 7). La déformation avant rupture est donc presque exclusivement élastique.

L'énergie de rupture, qui est représentée par l'aire sous la courbe contrainte déformation (obtenue par essai de traction), est faible

Le phénomène fragile correspond au cas où les dislocations ne peuvent pas se déplacer, ou dont les mouvements sont difficiles et limités. C'est le cas par exemple des alliages métalliques dans lesquels les caractéristiques de résistance ont été fortement augmentées. Ainsi, très généralement, la fragilité augmente avec la limite d'élasticité. Les ruptures fragiles, se faisant sans déformation plastique, se produisent par décohérence de plans cristallographiques. En somme, la rupture fragile se produit lorsque les liaisons interatomiques se rompent sans déformation plastique globale.



Figure 7: Rupture fragile



Figure 8: Rupture ductile

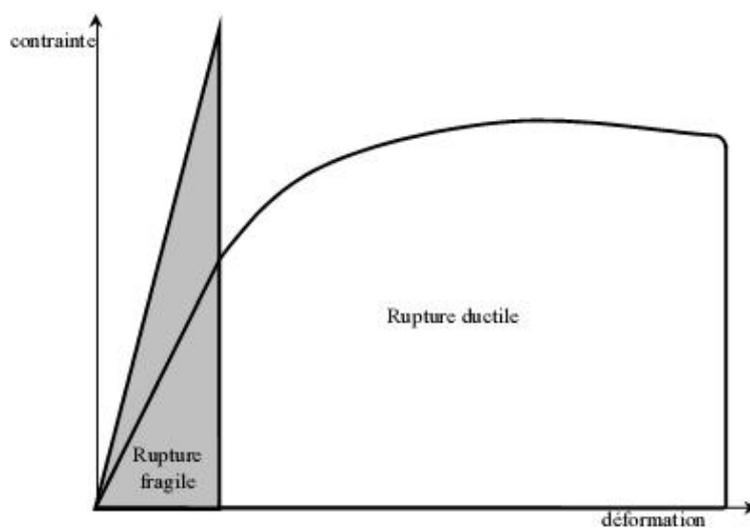


Figure 9: Courbe contrainte déformation dans le cas des ruptures fragile et ductile

I.3.3.1.2 La rupture ductile :

La rupture ductile est caractérisée par une forte déformation plastique après la phase élastique (Figure 8). L'énergie de rupture est alors beaucoup plus élevée. La rupture ductile est le résultat de l'instabilité des très grandes déformations locales engendrées au voisinage des défauts cristallins. Au voisinage de ces défauts, les sollicitations extérieures créent des concentrations de contraintes qui engendrent de grandes déformations plastiques.

L'énergie absorbée pour la rupture, la résilience, constitue une estimation du degré de fragilité / ductilité. L'essai de résilience (ou essai de Charpy) consiste à casser à l'aide d'un mouton-pendule une éprouvette de section carrée, entaillée ou non. La résilience est une caractéristique documentée par les fournisseurs de matériaux.

Les ruptures ductiles se produisent donc après le déplacement ou le glissement d'un grand nombre de dislocations. Cela entraîne des empilements de dislocations qui conduisent à la formation de microfissures. Lorsque ces défauts deviennent importants, le métal se déchire. La rupture apparaît généralement sous forme de cupules. C'est un examen macroscopique des surfaces de fracture qui révèle des zones inclinées à 45° par rapport au plan de glissement, dues à une rupture ductile. La (Figure 10) montre la variation de la résilience en fonction de la température.

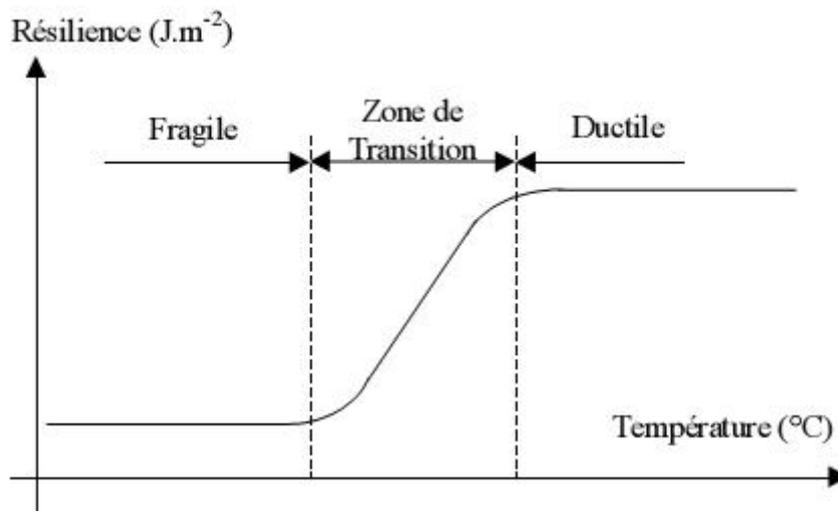


Figure 10: Evolution de la résilience en fonction de la température.

Cette courbe permet de distinguer trois zones de température :

- La zone à basse température est celle où la rupture est fragile,
- La zone à température plus élevée est celle où la rupture est ductile,

- Enfin la zone de transition est celle où la rupture est mixte. Elle se produit avec une déformation plastique limitée, le faciès de la fracture étant composé d'une zone à grains (fragile) entourée d'une zone à nerfs (ductile).

I.3.4. Matériaux utilisés dans la fabrication des tubes :

I.3.4.1. Introduction :

La sélection d'un matériau n'est jamais due au hasard dans l'industrie. Lors de la phase de conception, les caractéristiques des matériaux doivent être soigneusement étudiées et fixées afin d'éviter toutes complications lors de leur utilisation tout en évitant les coûts superflus.

Cela est encore plus vrai lorsqu'il s'agit de choisir un matériau pour un tube. Certains tubes sont en effet soumis à de fortes contraintes mécaniques, thermiques, ou encore chimiques selon le type de fluide qu'ils transportent, sa pression et sa température.

Le matériau dans lequel le tube a été fabriqué va avoir une influence sur toutes les opérations de fabrication dont les opérations d'usinage. L'usinabilité d'un tube dépend directement du matériau dans lequel il a été fabriqué et pour chaque matériau des précautions particulières doivent être prises afin de garantir un usinage de qualité.

L'usinage est une opération courante lors de la préparation au soudage par exemple, ou le bout du tube doit être usiné selon des angles précis de manière à permettre à la soudure de pénétrer le matériau sur toute l'épaisseur du tube.

Pour les pipelines et casing les aciers sont les matériaux les plus utilisés. [4]

I.3.4.2. Les aciers :

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14% en masse). La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en deçà de 0,008%, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer » ; au-delà de 2,14%, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on améliore la résistance mécanique et la dureté de l'alliage ; on parle d'aciers « doux, mi-doux, mi-durs, durs ou extra-durs » (classification traditionnelle).

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer

grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'acier traités. [4]

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales :

- Résistance aux efforts : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique ;
- Dureté
- Résistance aux chocs (résilience).

D'autre part, leur coût d'élaboration reste relativement modéré, car le minerai de fer est abondant sur terre (environ 5% de l'écorce) et sa réduction assez simple (par addition de carbone à haute température). Enfin les aciers sont pratiquement entièrement recyclables grâce à la filière ferraille.

On peut néanmoins leur reconnaître quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion, mais à laquelle on peut remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage galvanisation à chaud, etc.), soit par l'addition d'élément réalisant des nuances dites « inoxydables ». Par ailleurs, les aciers sont difficilement moulables, donc peu recommandés

Pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâtis de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes. Enfin, lorsque leur masse volumique est compromettante (dans secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux plus légers (alliage à base d'aluminium, composites, etc.), mais parfois beaucoup plus chers.

De ce fait, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (rails, signalisation), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), moyens de transport (carrosseries, transmission), composants mécaniques (visserie, ressorts, câble, roulement engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette). Les aciers sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine) : cette liste est loin d'être exhaustive.

I.3.4.3. Composition des aciers :

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

- Les aciers hypoeutectoides (de 0,008 à 0,77% de carbone) qui sont les plus mous.
- Les aciers eutectoïde (0,77% de carbone).
- Les aciers hypereutectoides (de 0,77 à 2,11% de carbone) qui sont les plus durs.

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi des autres éléments d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe). [5]

I.3.4.4. Les aciers recommandés pour les tubes :

Les tubes modernes de transport de gaz sont produits à partir de tôles obtenues par laminage contrôlé. Ce procédé consiste à optimiser les conditions de laminage en imposant certains paramètres du procédé de mise en forme et de traitement thermique.

Les propriétés des aciers de structure ferre-perlite obtenus par laminage dépendent essentiellement :

- La taille du grain ferritique.
- Du durcissement par précipitation sous forme de nitrures, carbures ou carbonitrures formés par réaction du carbone et de azote avec certains éléments de microalliage (V, Nb etc...).
- Durcissement de solution solide.

Chapitre II

*Analyse du processus
de production des tubes*

II.1. Introduction :

L'analyse technologique du processus de fabrication des tubes se propose d'étudier les différentes phases d'élaboration du tube depuis le lingot jusqu'au tube fini par des analyses cinématique, dynamique et rhéologique. L'analyse cinématique est consacrée à une description simple des différents mouvements de l'ébauche et les conditions dans lesquelles elle évolue au cours des différentes étapes de transformation et qui constituent un paramètre important dans l'apparition des contraintes résiduelles. L'analyse dynamique fait ressortir les différents efforts agissant sur l'ébauche au cours du laminage et l'énergie dépensée à cet effet. Enfin, l'analyse rhéologique porte sur l'étude du phénomène de plasticité de la matière pendant le laminage et le comportement élastique qui en résulte. L'objectif de cette étude, rappelons-le, doit permettre d'identifier d'une manière qualitative les origines des contraintes résiduelles dans le processus de fabrication.

II.2. Analyse cinématique du processus de fabrication :

La décision de créer en Algérie une tuberie sans soudure fut liée à un important programme de recherche et d'exploitation de gisements d'hydrocarbures liquides et gazeux outre l'utilité dans d'autres secteurs. Dans le secteur des hydrocarbures, la TSS est sollicitée en grande partie par Sonatrach et Kanagaz pour des projets de transport et de collecte.

Les différents tubes réalisés à la TSS sont désignés comme suit :

- tubes **CASING**, servant au coffrage des puits.
- tubes **TUBING**, servant de conduite à l'intérieur des puits, pour la remontée des hydrocarbures liquides et gazeux.
- tubes **PIPE-LINE**, servant de conduite au sol, entre puits et centres de collecte.
- tubes **DRILL-PIPE**, ou tubes de forage.
- tubes **DIVERS et TARIF** de différentes dimensions, servant à l'usage courant, tel que les conduites hydrauliques, tubes à gaz et tubes commerciaux.

Le processus de laminage à la T.S.S est très important et compliqué. La complexité des opérations s'explique par le fait qu'une ébauche effectue des mouvements de rotation et d'avancement très variés pendant la déformation, ce qui donne à l'ébauche un allongement, une réduction de diamètre et une réduction de l'épaisseur dans chaque opération. Schématiser les

différentes phases d'élaboration du tube nécessite d'abord une description des différents mouvements de l'ébauche dans la chaîne cinématique de l'installation. Le schéma technologique de la production des tubes sans soudure fait appel à la déformation plastique à chaud de la matière et comporte 4 opérations principales :

- Perçage du lingot dans une presse ou dans un laminoir
- Mandrinage et allongement de l'ébauche
- Calibrage du tube dans le calibreur
- Réduction du diamètre et allongement du tube par étirage (Tubes $\varnothing < 5''$)

L'atelier de laminage est subdivisé en 5 zones principales.

- 1- Zone préparation des lingots (Aciérie électrique)
- 2- Zone préparation des ébauches (Laminoir perceur-élongateur, laminoir oblique)
- 3- Zone laminage (Laminoir à pas de pèlerin)
- 4- Zone calibrage (Tubes $\varnothing > 5''$)
- 5- Zone réduction (Tubes $\varnothing < 5''$)

II.2.1. Zone préparation des lingots :

La production des lingots s'effectue à l'aciérie électrique, où trois gammes sont réalisées :

- Lingots polygonaux : de section dodécagonale (12 côtés)
- Lingots polygonaux : de section octogonale (8 côtés)
- Lingots ronds : de section circulaire (destinés au Laminoir Réducteur Étireur)
- Matière : -Acier ordinaire (0.05÷0.30 % C)
- Acier faiblement allié, résistant à chaud, anti-acide

Néanmoins, la composition chimique exacte des aciers des tubes est laissée au soin de chaque client. Ce qui permet à chacun de mettre au point l'acier dont les caractéristiques mécaniques permettent de satisfaire son cahier de charge.

Tubes ayant servi aux essais : $\varnothing 70$ A37

$\varnothing 73$ N80 (Nuance équivalente en norme Afnor à 20M5)



Figure 11 : pars des lingots

II.2.2 Zone préparation des ébauches :

Elle consiste en :

- ❖ Un chauffage des lingots dans un four à sole tournante.

L'opération de chauffage des lingots dans le four à sole s'effectue à 1300°C, pour un temps de chauffage de 7 à 8 mn/cm.

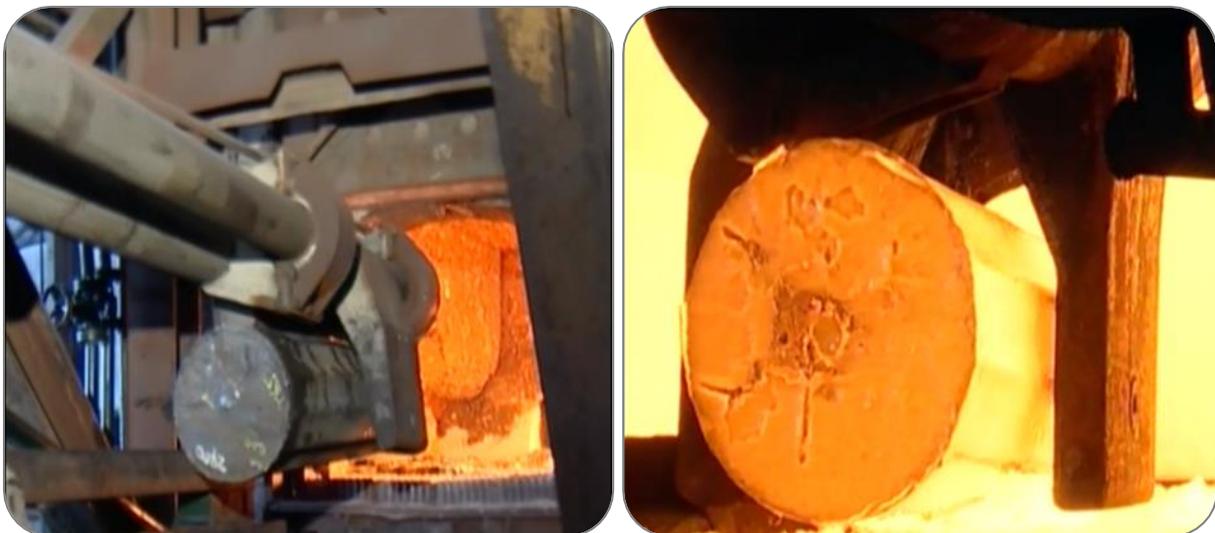


Figure 12: Four a sole (lingot au 1300°C) [6]

- ❖ Un perçage :
 - dans une presse à percer pour les lingots dodécagonaux.
 - d'un trou de centre pour les lingots ronds.

L'opération de perçage concerne les lingots dodécagonaux pour leur permettre en plus du arrondissement, le refoulement des défauts du fait de sollicitations très fortes du métal lors de l'opération de perçage vers le balai. Le diamètre de perçage est généralement la moitié du * du lingot. La température du lingot à ce niveau atteint les 1200°C. L'opération de perçage concernant les lingots ronds consiste en un perçage d'un trou de centre qui permettra lors du laminage le guidage de l'ébauche vers le mandrin.

- Capacité : Ø214 - Ø500 mm
- Longueur : Ø800 – Ø1800 mm
- Coefficient d'allongement : 1.15
- Température mini : 1200 °C



Figure 13 : presse à percer de (800-1200) tonnes [6]

Il doit procéder au changement de montage :

- Changement des outillages.
 - Démontage / Remontage : matrice
 - Démontage / Remontage : corps centreur
 - Démontage / Remontage : selles
 - Appuis fixe et mobile
 - Refroidissement / Lubrification matrice
- ❖ Un réchauffage éventuel dans un four à plateau (Lingots dodécagonaux). Pour réchauffage des ébauches pressées à une température de 1300 °C

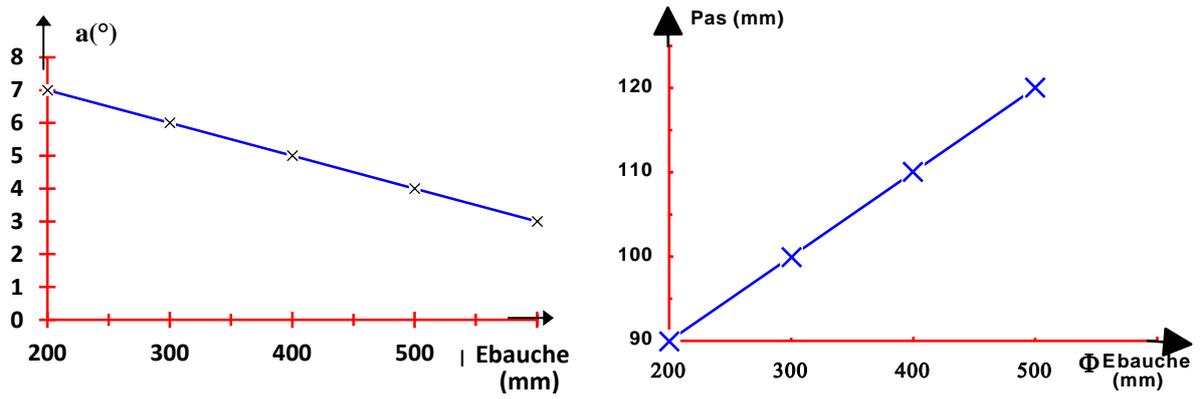


Figure 15 : Inclinaison et pas d'avance des cylindres en fonction du diamètre de l'ébauche

Il Procède au :

- Changement de montage.
- Changement des outillages (pièce de base – couloir tige LO).
- Réglage théorique de la machine selon la gamme en cours de fabrication



Figure 16 : Laminoir oblique

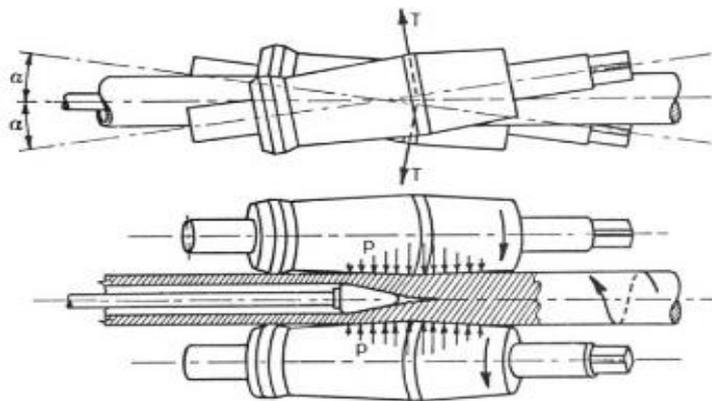


Figure 17 : Phases de transformation de l'ébauche, au cours du perçage au laminoir oblique.



Figure 18 : Emprise de l'ébauche entre le mandrin de perçage et les cylindres obliques d'une part et les guides inférieur et supérieur d'autre part

II.2.3 Zone de laminage au laminoir pèlerin :

L'ébauche percée et allongée suivant les opérations décrites précédemment est ensuite allongée et amincie sur un mandrin cylindrique dans le laminoir à pas de pèlerin à profil variable. La signification du laminoir à pas de pèlerin est liée à la cannelure du cylindre divisée en 2 parties : partie de travail où l'ébauche marque un pas en arrière et la partie à vide où l'ébauche marque deux pas en avant

* de l'ébauche max : 9" 5/8 (244.5 mm)

Énergie de déformation d'un tube de 13" 3/8: 2182 kW.s.

$T^{\circ} = 1000^{\circ}\text{C}$



Figure 19: Emprise de l'ébauche au laminoir à pas de pèlerin

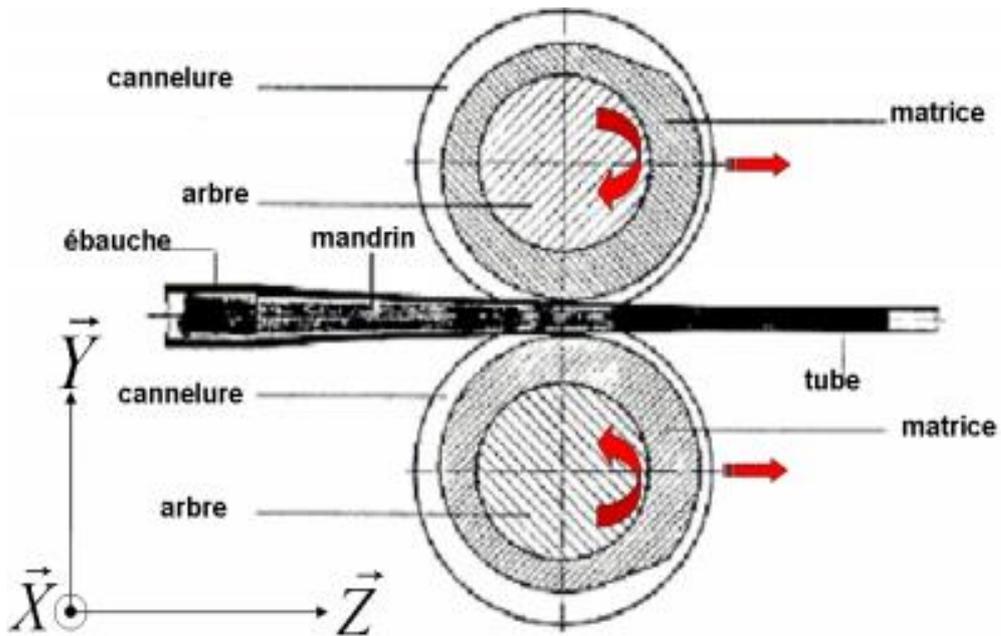


Figure 20 : Représentation de la cannelure du cylindre du laminoir à pas de pèlerin. [7]

Fonction :

- Éliminer les défauts sur cylindre LP.
- Préparer une solution de graphite dont le mélange est composé de :
(eau – graphite – colle)
- Il doit alimenter les trains selon la cadence des laminoirs

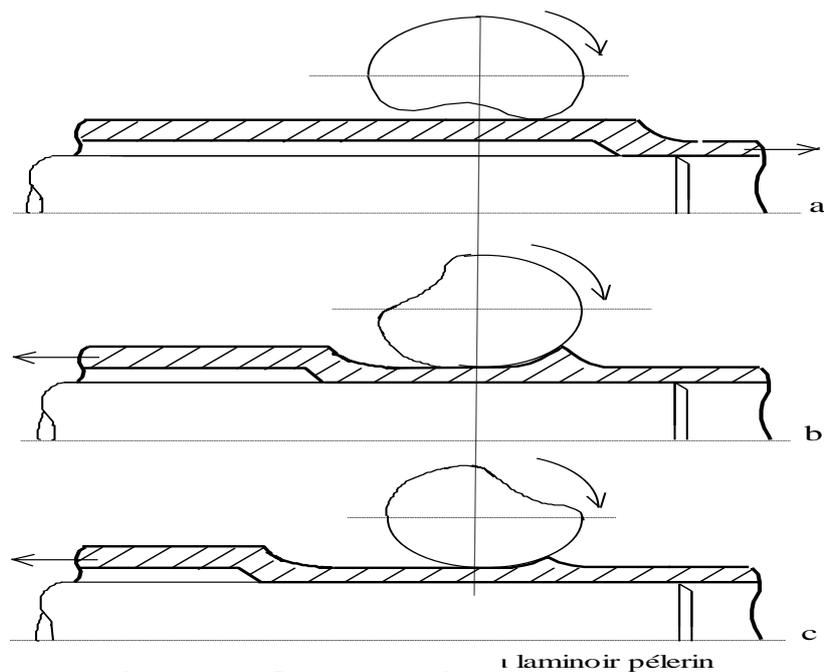


Figure 21 : Principe du laminage au laminoir pèlerin

Le laminage à pas de pèlerin se décompose en 4 phases (Figure. 21) :

1. Introduction de l'ébauche entre les cylindres dans la fausse cannelure (a).
2. L'écrasement d'une petite quantité de métal par l'attaque (b).
3. Le lissage de cette même quantité par le finisseur (c).
4. Le dégagement de l'ébauche par la sortie (changement de la zone de travail à la zone à vide).

L'ébauche est ainsi transformée en tube par écrasements successifs à chaque tour

II.2.4 Zone calibrage ($\text{Ø} > 5''$) :

Après laminage, sciage à 15 m, pesage et métrage, on procède au:

- réchauffage des tubes à une t° homogène de 850° à 875°C .
- décalaminage au moyen de rampes d'eau sous pression à 160 bars.
- calibrage : opération de finition qui achève l'arrondissement et les dimensions du tube, par le biais de 5 cages alternées, chacune présentant 2 galets.

➤ **Fonction de calibreur :**

Obtenir un diamètre à chaud dans les tolérances, ceci s'effectue par réduction successive dans une série de cages calibreur alternés de 90° l'une par rapport à l'autre.

Le rôle du calibreur est de faire la correction des diamètres extérieurs des tubes, selon les tolérances exigées à chaud et la température de calibrage est comprise entre 850°C et 900°C



Figure 22: Calibreur

Exemple d'un tube ayant subi les différentes étapes de transformation au cours du laminage :

L'exemple est donné pour le cas d'un tube (Casing 7") s'arrêtant au calibre à 5 cages.

Phase	Lingot	Ébauche		Tube laminé	Tube calibré	Tube fini	
Opération	Coulée (Aciérie)	Après Perçage (Presse)	Après Allgt (Lam. oblq)	Après chuttage (Lam. Pélerin)	Après calibrage (Calibr. 5cages)	Contrôle	
Dimensions	∅ (mm)	300	303.5	270	183.7	180.8	178.6
	e (mm)	/	76.75	45	6.9	6.9	6.9
	L (mm)	1.32	1.5	2.5	20	2X10	2X9.2
	P (kg/m)	491	418.08	249.7	29.88	29.63	29.26

Tableau 1 : Variation des dimensions de l'ébauche au cours du laminage.

Les variations de diamètre, de l'allongement, de l'épaisseur et du poids au mètre (Tab.1) montrent que:

- les ébauches courtes et épaisses subissent un travail très important de laminage dans les différents laminoirs, avant d'obtenir les dimensions du tube fini.
- le travail de plasticité le plus important se produit dans le laminoir oblique.
- l'écrasement en surface du tube ne cesse de se produire jusqu'à la dernière phase.

Pour les tubes destinés au L.R.E, le taux de réduction peut aller jusqu'à 60% sur le diamètre dans le cas de petits tubes ($\emptyset < 5''$).

II.2.5 Zone Réduction :

Elle concerne les tubes de diamètre inférieur à 5". Le laminage se produit au Laminoir Réducteur Étireur (L.R.E) après les étapes précédentes. Les tubes ayant servis à nos essais, proviennent de ce laminoir.

II.2.5.1. Description :

Les cages du laminoir réducteur étireur sont posées par paires dans le montant. Dans le laminoir présent, il y a 10 montants de 2 cages chacune. Chaque cage possède 3 cylindres situés sous un angle de 120°. Les 2 cages d'une paire sont posées d'une façon à ce que l'on ait dans chaque montant un décalage de 60° entre les cylindres. Chaque cylindre est entraîné par un réducteur à pignons coniques séparés de façon à pouvoir varier la vitesse séparément pour chaque cage. Le moteur principal entraîne, par l'intermédiaire d'un réducteur commun, les réducteurs répartiteurs de chaque cage, ceux-ci étant munis de différentiels. La vitesse d'entraînement étant égale à 1000 tr/mn. La variation de vitesse est obtenue par système oléo dynamique.

Caractéristiques du L.R.E :

- des gales : 360 mm
 - Distance entre les cages : 340 mm
 - Moteur d'entraînement : 1200 kW
- V= 1000tr/mn
- U (tensions d'alimentation)= 5.5 kV

Le Tableau suivant nous donne une idée, sur les différentes transformations d'un tube au cours du laminage

Opération		Lingot	Centrage	Perçage et élongation	Laminage	Réduction et étirage
Lieu		Aciérie électrique	Presse à centrer	Laminoir oblique	Laminoir à pas de pèlerin	Laminoir réducteur étireur
P a r a m è t r e S	Øext (mm)	225	/	175 (réduction de 23%)	149 (Ø Calibre)	70
	Øint (mm)	/	Petit trou de centre	145 (Ø mandrin + Ovalisation)	136 (Ømandrin)	60
	Épaisseur (mm)	/	/	15	6.5	5
	Longueur (m)	1.5	3.5	20	60	
	Température (°C)	/	/	1300	1000	950
	Temps de séjour (mn)					2 mn/mm d'épaisseur

Tableau 2 : Les différentes étapes de transformation du tube Ø 70 au cours du laminage

II.3. Analyse dynamique du processus de fabrication :

La variation des dimensions entre l'ébauche ($\varnothing 225$ mm, L 1.5 m) et le tube à la réception ($\varnothing 70$ mm, L 60 m) comme indiqué au Tableau , montre que les ébauches subissent un travail très important de laminage et que de très grands efforts de déformation sont fournis. Dans cette partie, on se propose donc de dresser une étude sur les efforts appliqués, leur quantité, leurs directions et leur rapport avec les contraintes en général et les contraintes résiduelles en particulier.

II.3.1. Étude des efforts au laminoir oblique :

Pendant le laminage transversal et hélicoïdal, des forces normales et tangentielles apparaissent au point de contact. Le lingot est introduit dans la cage par un pousseur jusqu'au contact des cylindres. Les cylindres latéraux qui forment entre eux un cône d'entrée sont animés d'un mouvement de rotation de même sens. Une inclinaison par rapport au plan horizontal est nécessaire pour assurer un mouvement d'avance hélicoïdal de la matière. L'introduction et l'entraînement de l'ébauche doivent satisfaire deux conditions :

- un effort de contact cylindre / ébauche par l'effet de coin (inclinaison β)
- un frottement suffisant entre cylindres et ébauche.

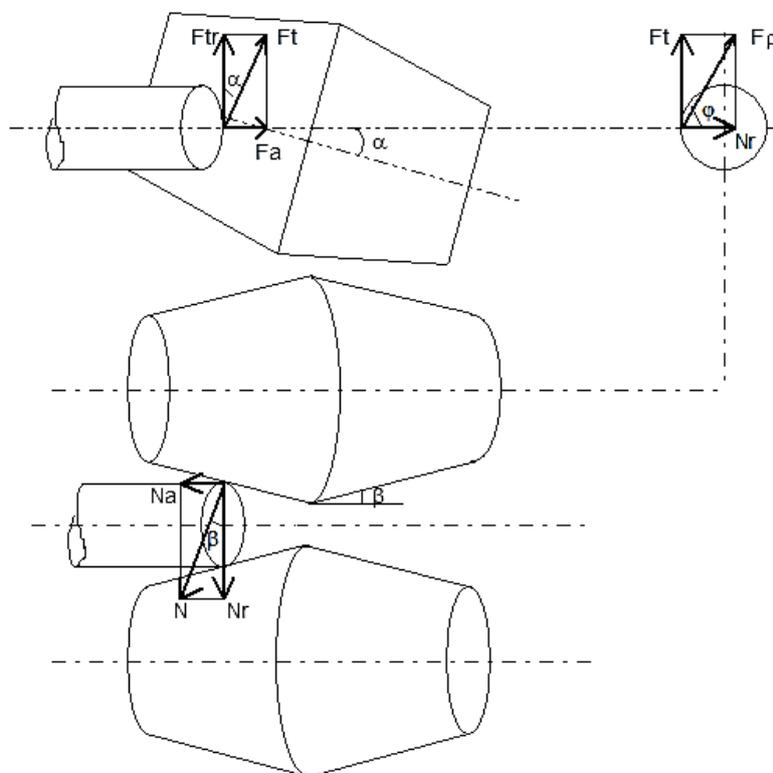


Figure 23 : Décomposition des efforts au laminoir oblique

α : Angle d'inclinaison de chaque cylindre par rapport au plan horizontal ($4^\circ / 7^\circ$).

Pour le diamètre 225, α utilisé = 7° .

α : Angle issu du cône d'entrée que forme entre eux les 2 cylindres latéraux. β est déterminé par la génératrice d'un cylindre au point de contact et l'axe de laminage.

F_t : Effort d'entraînement de l'ébauche, tangentiel aux cylindres, dû au couple moteur de rotation. Il engendre sur l'ébauche :

- un effort de rotation : $F_{tr} = F_t \cdot \cos \alpha$.
- et un effort d'avance : $F_a = F_t \cdot \sin \alpha$.

N : Effort normal à la génératrice du cylindre au point de contact qui se décompose en :

- $N_r = N \cdot \cos \beta$: Composante radiale de N , qui écrase la matière.
- $N_a = N \cdot \sin \beta$: Composante axiale de N , qui s'oppose à l'avance.

F_t sera d'autant plus important que :

- l'effort de contact N est important
- et le coefficient de frottement est grand (recours au moletage sur le pallier avant du cylindre).

T : Effort de frottement donné par : $T = N \cdot \text{tg} \varphi$, avec $\text{tg} \varphi$: coefficient de frottement égal à 0.3.

Condition d'engagement et d'entraînement de l'ébauche dans le laminoir : $F_a \gg N_a$.

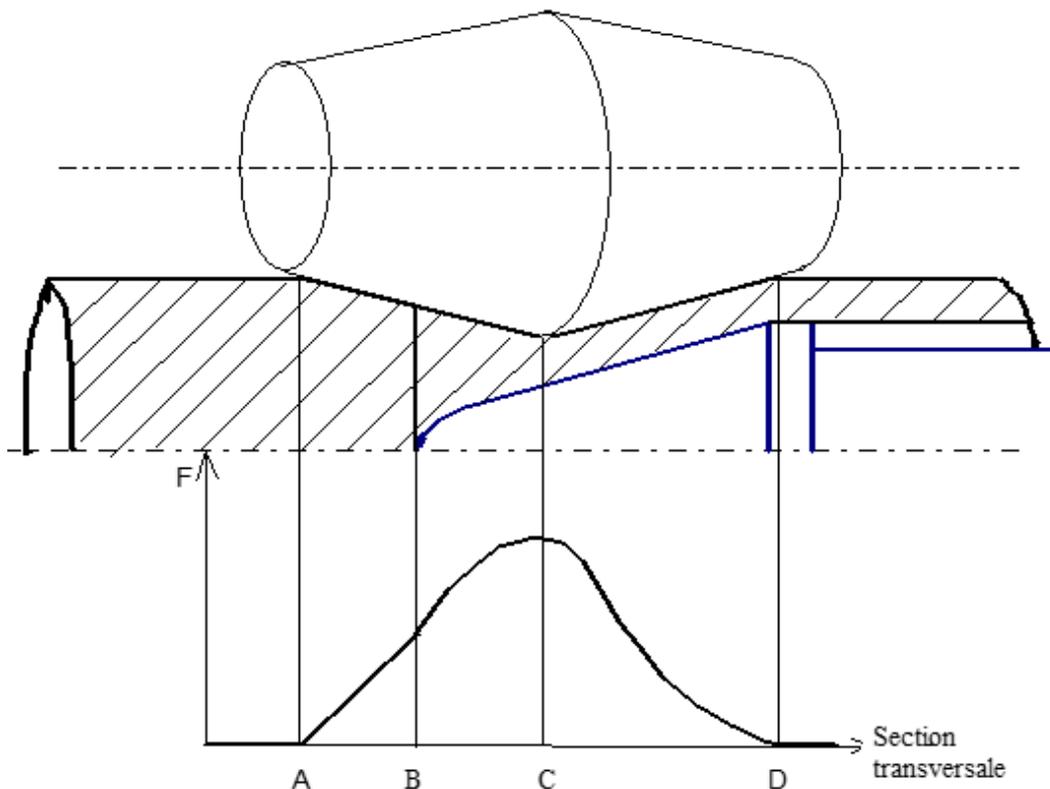


Figure 24 : Répartition des efforts d'écrasement de l'ébauche au laminoir oblique

II.3.2 Étude des efforts au laminoir à pas de pèlerin :

Les conditions de travail sont variées, c'est pourquoi on parle de foyer de déformation instantané. L'ébauche est ainsi transformée en tube par écrasements successifs à chaque tour de l'ébauche. La valeur des efforts exercés change au cours du procédé de fabrication. L'analyse de l'oscillogramme des efforts (Figure 24) montre l'importance des efforts dans chaque phase.

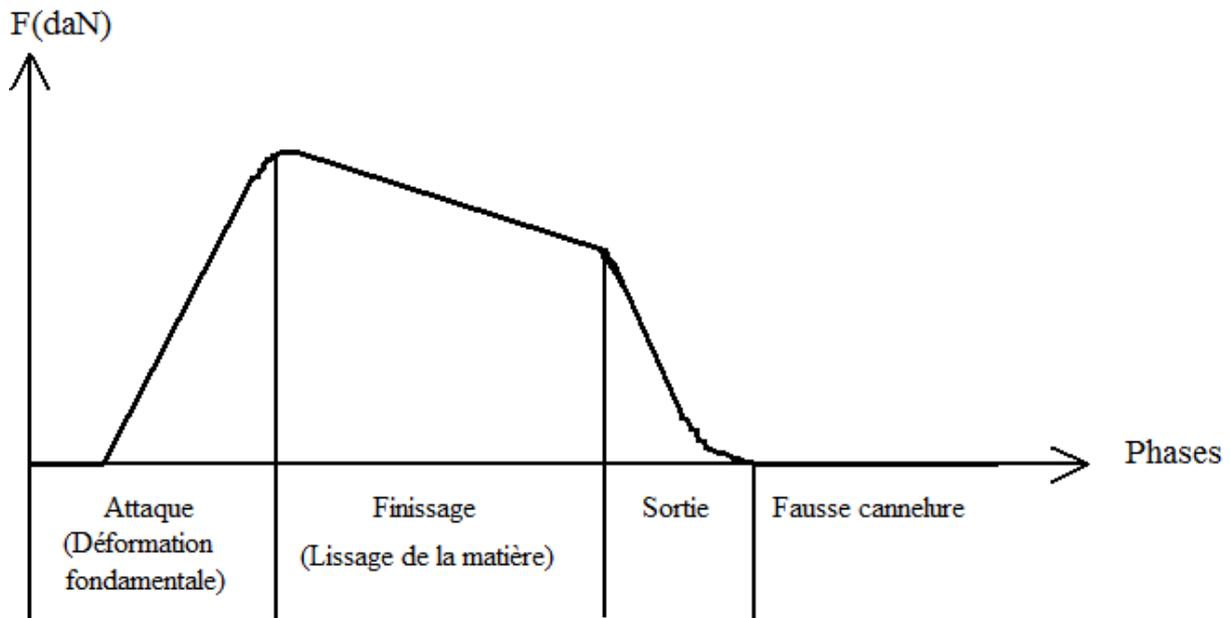


Figure 25: Répartition des efforts au cours d'un cycle du laminage

II.3.3 Étude des efforts au laminoir Réducteur-Étireur :

Le laminage se faisant sans mandrinage. Le laminoir applique à l'ébauche, transversalement un corroyage entre les galets, et longitudinalement un étirage entre les cages.

Le métal est soumis à l'action des efforts suivants (Figure.26) :

- des forces de pression \vec{N} sur la section
- des forces de frottement \vec{F}_t
- des forces de traction \vec{F}_l

Les effets de ces efforts sur la matière seront donnés dans le paragraphe (Contraintes au L.R.E).

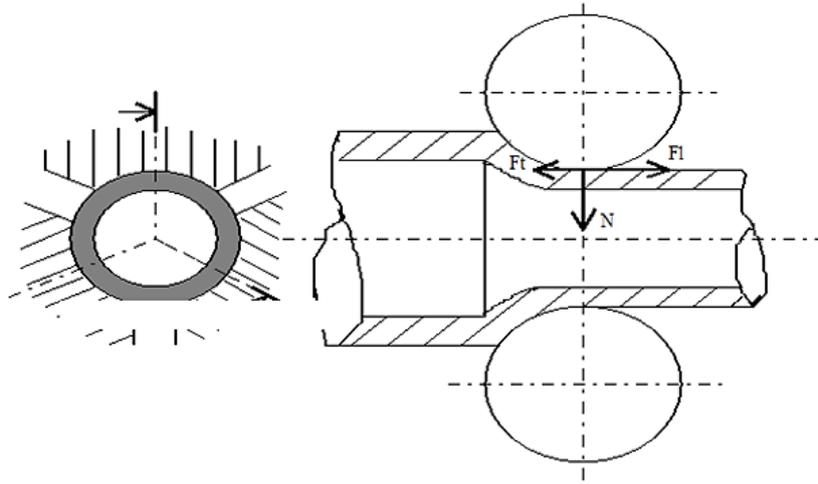


Figure 26 : Efforts au laminoir réducteur étireur



Chapitre III

Étude Expérimentale

III.1. L'Essai de traction :

III.1.1. Introduction :

L'essai de traction permet d'obtenir de nombreuses Informations (module d'élasticité, limite d'élasticité, charge maximale, allongement à Rupture...) à partir d'une déformation homogène dans la partie utile.

Deux échantillons d'éprouvettes sont prélevés de 2 endroits différents du tube de longueur 4 m. Lun de l'extrémité avant et l'autre de l'extrémité arrière.

III.1.2. Caractéristiques nominales:

- **Limite d'élasticité :**

$$Re = \frac{Fe}{S_0}$$

Re : limite élastique en MPa.

Fe : charge maxi élastique en N.

S₀ : section initiale en mm².

- **Résistance à la traction :**

$$Rm = \frac{Fm}{S_0}$$

Rm : Résistance à la rupture en MPa.

Fm : charge à la rupture en N

S₀ : section initiale en mm²

- **Allongement à la rupture :**

$$A\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

L: longueur ultime après rupture en mm

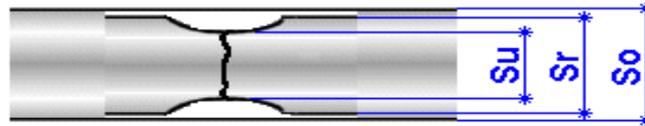
L₀ : longueur initiale en mm

• **Striction à la rupture :**

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

S_u : section finale après rupture en mm².

S₀ : section initiale en mm².



S_0 : Dimension éprouvette initiale
 S_r : Dimension éprouvette après rupture
 S_u : Dimension de la striction après rupture

Cette déformation est également la somme de la déformation homogène répartie et de la déformation de striction proprement dite.

- **Module de Young** : représenté par la pente de la courbe dans sa partie linéaire :

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- la déformation et la contrainte nominales (conventionnelles, de l'ingénieur ("engineering Strain")), définies à partir des données brutes sans correction de section

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- la déformation et la contrainte vraies (true strain, déformation logarithmique), (contrainte de Cauchy, rationnelle), tenant compte de la diminution de section

$$\varepsilon_v = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\sigma_v = \frac{F}{S}$$

Moyennant les hypothèses classiques de plasticité isochore et en n'négligeant l'élasticité face à la plasticité, il est possible de lier les mesures vraies aux mesures nominales

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$$

- **Corrigé de la courbe rationnelle de traction :**

Dans l'essai de traction, on mesure les efforts rapportés à la section initiale de l'éprouvette.

Il existe une représentation de la courbe de traction, de plus en plus utilisée en laboratoire, qui consiste à reporter la contrainte vraie σ en fonction de la déformation rationnelle ε_v ; c'est la courbe rationnelle de traction.

L'allure d'une telle courbe est représentée sur la figure ci-après.

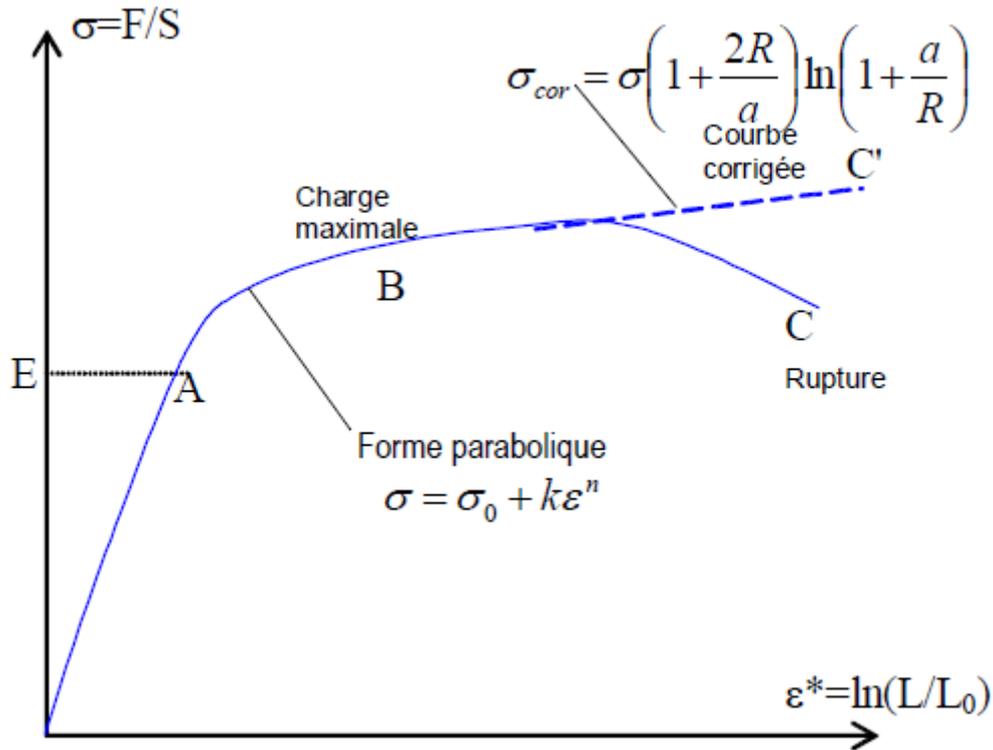


Figure 27: courbe contrainte vraie en fonction de la déformation vraie

Sur cette courbe il n'y a pas de différence avec le tracé ordinaire pour la partie élastique et la limite d'élasticité R_e , car les déformations élastiques sont très faibles entre la limite d'élasticité et le point correspondant à la charge maximale, la courbe a une forme parabolique

La formule de correction la plus utilisée est celle de BRIDGMANN :

$$\sigma_{cor} = \sigma \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{R}\right)$$

a : étant le rayon de la section minimale,

R : le rayon de courbure de la zone de striction.

Après correction, cette partie de la courbe rationnelle peut être considérée comme sensiblement linéaire.

III.2. - Laboratoire des essais mécaniques a l'AMPTA :

Le Département Qualité de la société « AMPTA » dispose d'un laboratoire d'essais mécaniques qui lui assure la vérification des caractéristiques mécaniques par le biais d'essais de traction, de résilience et de dureté et la bonne interprétation des résultats devant permettre de déterminer la conformité du produit aux normes et spécifications de fabrication avant sa libération pour utilisation.



Figure 28: Laboratoire des essais mécaniques d'AMPTA

III.3. Types d'essais réalisés dans le laboratoire d'AMPTA :

Le laboratoire réalise trois types d'essais :

- Essais de traction
- Essais de résilience
- Essais de dureté

III.4. Étude expérimentale :

III.4.1. Propriétés mécaniques du matériau :

Le matériau utilisé dans ce travail est un acier API 5L Grade B, X52, produit par l'AMPTA (Arcelor Mittal pipe et tube Alegria). D'après la dite norme, les propriétés mécaniques et la composition chimique sont données dans les tableaux :

Nuance	$\sigma_e \text{ min}$	$\sigma_r \text{ min}$	E	A%
X52	420 MPa	560MPa	190 GPa	28,64

Tableau 3 : Propriétés mécaniques de l'acier API 5L Grade B, X52

III.4.2 - Analyse chimique :

La composition chimique du matériau à été faite par analyse spectrale par un spectromètre de type *SPECTROLAB* disponible au niveau du laboratoire de métallurgie de ALFATUS dans le Tableau suivant :



Figure 29: Spectromètre (type SPECTRLAB)

0,14	1,30	0,20	≤	≤	≤	≤	≤	≤	0,018	≤	≤	≤	≤
0,16	1,36	0,30	0,024	0,014	0,050	0,050	0,025	0,040	0,040	0,080	0,010	0,050	0,039
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Al	Cu	Sn	Ni	Ti
0.14	1.25	0.26	0.002	0.005	0.15	0.009	0.001	0.008	0.20	0.036	0.002	0.012	0.003
0,15	1,33	0,26	0,005	0,007	0,014	0,008	0,001	0,008	0,025	0,035	0,003	0,012	0,003
0,15	1,32	0,25	0,006	0,008	0,015	0,009	0,001	0,007	0,025	0,034	0,003	0,013	0,003
0.14	0.25	0.27	0.004	0.002	0.017	0.007	0.001	0.008	0.029	0.036	0.002	0.007	0.004

Tableau 4 : La composition chimique pour l'acier API 5L grade B, X52

On remarque que notre matériau est totalement conforme avec la norme API SPEC 5L Grade X52 Cependant, il faut noter la présence des éléments d'additions tel que le Cr, le Ti et le Mo qui contribuent à l'augmentation de la résistance du matériau, les éléments Ni, Al et Cr qui permettent de garder une certaine malléabilité, qui favorise des ruptures ductiles dans le sens d'une sécurité de défaillance.

III.5. Conduite de l'essai de traction :

III.5.1. Détermination des propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques de l'acier API 5L, Grade X52, ont été déterminées en utilisant des essais de traction. Les éprouvettes de traction sont prélevées d'une virole d'un tube dans le sens longitudinale selon la norme API 5L (Figure 30). Deux échantillons

d'éprouvettes sont prélevés de 2 endroits différents du tube de longueur 12 m. Lun de l'extrémité avant et l'autre de l'extrémité arrière

III.5.2. Géométrie de l'éprouvette de traction :

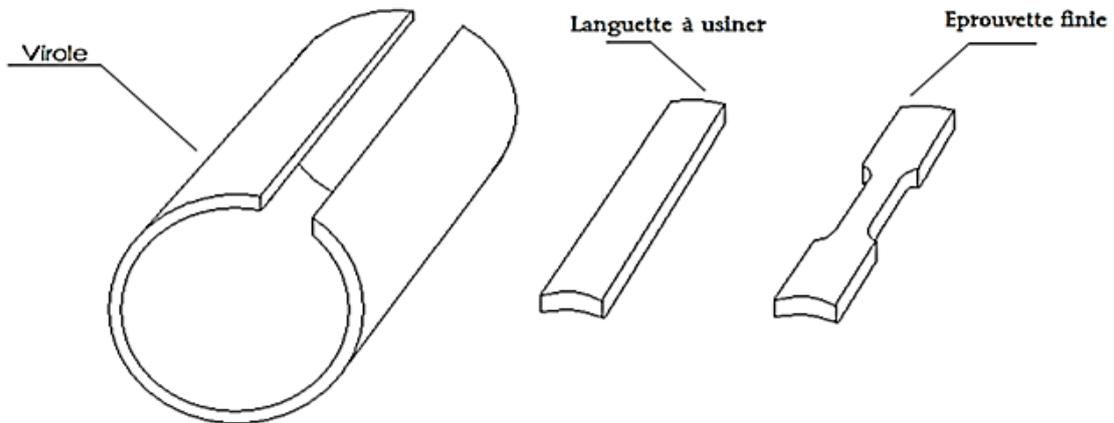


Figure 30 : Méthode de prélèvement des éprouvettes de traction

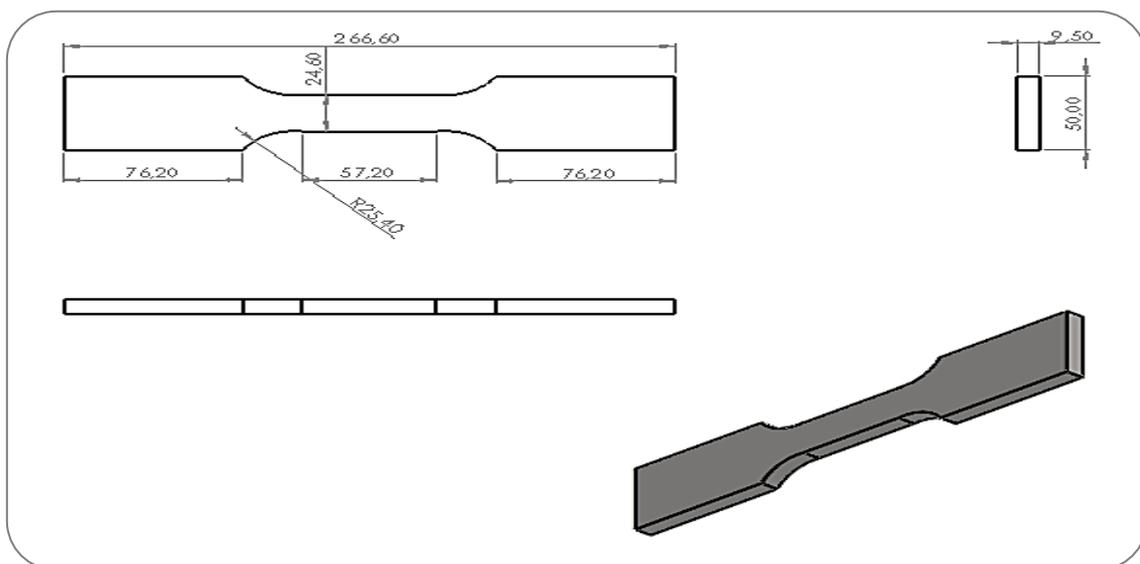


Figure 31 : Dessin et dimension d'éprouvette en 3D sur SolidWorks



Figure 32 : Languette et Eprouvette plate de traction de l'acier API-X52

III.5.3. Machine d'essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort croissant et régulier de traction. Nous avons effectué l'essai de traction au laboratoire des essais mécaniques de métallurgie de l'entreprise nationale algérienne SIDER dans le service « TSS », sur une machine universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL de capacité 1300KN, selon la norme DIN 50125 : 2009.07

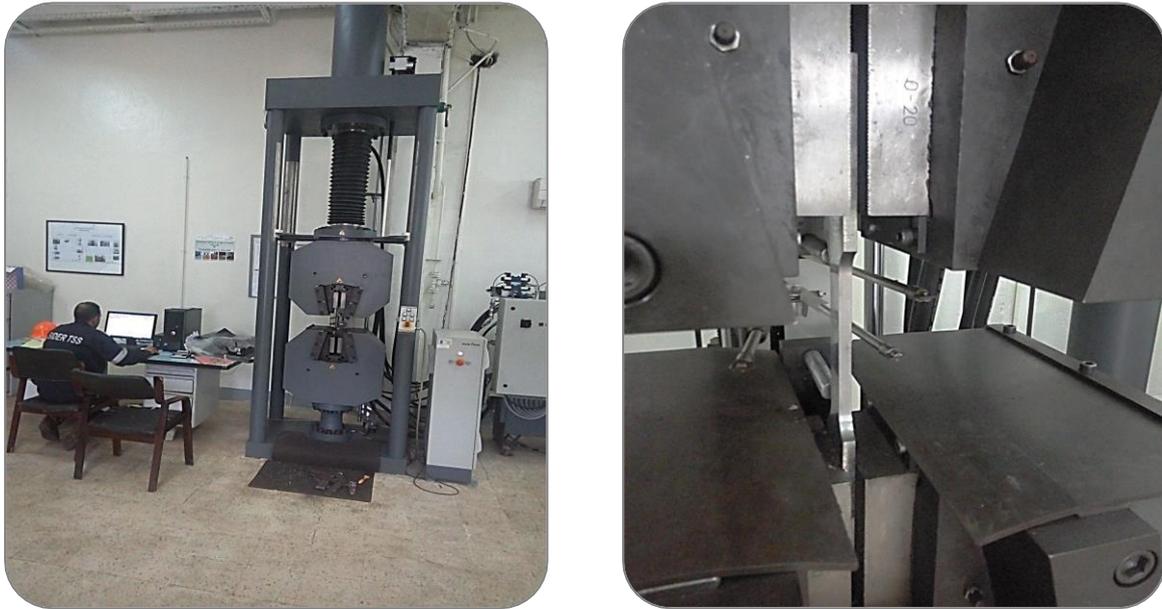


Figure 33 : Machine de traction universelle De type Z1200 ZWICK/ROELL

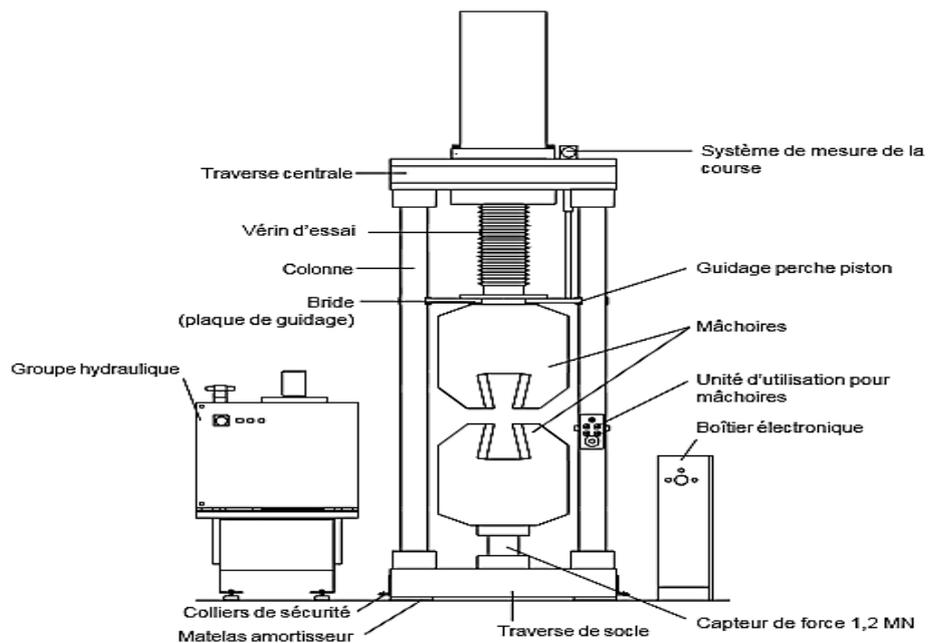


Figure 34 : les outils de machine Z1200 ZWICK/ROELL

III.5.4. Résultats de l'essai de traction :

Titre	PV essai de traction	Dimensions	323.9 x 9.5
Client	CEEG/KD-AL	Nuance	X52Q
N° Commande	67046.17	Type d'éprouvette	Plate
Norme	API 5L	Agent d'essais	Rahim
Précharge	5 MPa	Vitesse de la limite d'élasticité	60 MPa/s
Vitesse du module	60 MPa/s	Vitesse d'essai	0.008 1/s

Tableau 5 : PV de traction

- Tableau des résultats :

Ref	N°	N° Tube	Repère	Prélév	S ₀ mm ²	R _{p0.5} Mpa	R _m Mpa	R _{p0.5} / R _m %	A _{t (corr)} %	R _m Mpa	R _{eL}	F _m KN	E Gpa
	max					530	760	85	----				
	min					360	460	----	26,00				
Echant. 1	2	1806 7	BZ1 13B	AR	402,15	440	558,7	78,77	41,24	450	437	224,67	182
Echant. 2	5	1807 0	CD1 1C	AV	397,28	420,3	560,6	74,98	28,64	424	417	222,71	190

Tableau 6 : Résultats de traction

Graphique de séries:

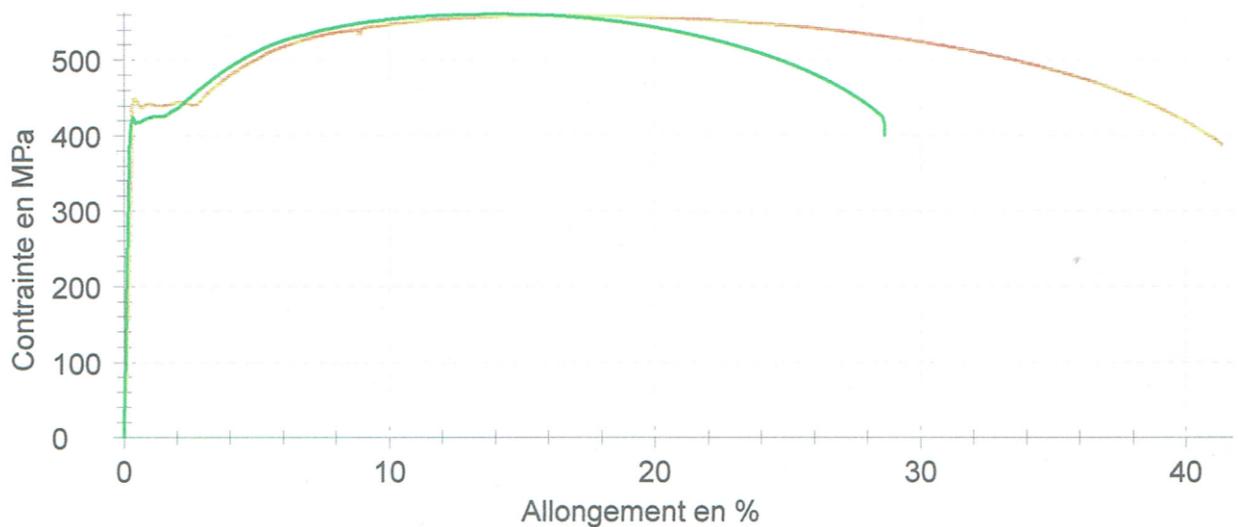


Figure 35: Courbes Contrainde-Déformation des 2 Echantillons prélevés du tube

III.6. Résultats des essais de traction et Discussions :

Les résultats des essais réalisés à la TSS ont gardé uniquement les courbes sans nous fournir les tableaux ayant donné la représentation de ces courbes. Donc ; en vue d'une représentation des courbes conventionnelles et rationnelles ; les valeurs ayant permis de tracer ces courbes sont nécessaires pour la détermination de ces courbes. Donc une numérisation des courbes fournies par la TSS est proposée.

III.7. Numérisation des courbes à l'aide des Logiciels Digitizer et OriginLab :

III.7.1. Introduction :

Digitizer est un programme Java utilisé pour extraire les données d'une courbe 2D scannée ou déjà disponible sous forme d'une image issue d'un fichier PDF ou d'une page web.

Très souvent les données sont présentées dans des rapports de stage, thèses ou articles sous la forme de courbes de type « Y en fonction de X » : $Y=f(X)$. Afin d'utiliser ces courbes, il faut le plus souvent en extraire les données. L'ancienne méthode très compliquée, consiste à utiliser une règle et un crayon afin de relever les coordonnées (X, Y) des points constitutifs de la courbe.

Ce programme permet à partir d'une image scannée d'une courbe (au format PNG, JPEG et GIF) de rapidement extraire les données sous la forme d'un tableau de données à deux colonnes (une colonne pour les Y, l'autre pour les X). Ce tableau peut être sauvegardé dans un fichier texte et être réutilisé comme bon vous semble.

Pour extraire les données il faut d'abord passer par une étape de calibration. Ensuite il suffit de cliquer sur les points de la courbe que vous voulez acquérir. Une fonction "semi-auto" est également proposée avec laquelle vous surlignez la courbe avec un pinceau d'épaisseur ajustable.

Cette méthode ne fonctionne pas pour tous les graphes et est à réserver en particulier aux courbes en noir et blanc continues, sans sections verticales, et qui ne croisent pas d'autres courbes. Au menu des autres fonctionnalités offertes par ce petit logiciel on peut noter la mesure de distance entre points et le calcul de superficie : ce qui revient en fait à réaliser numériquement une opération d'intégration mathématique.

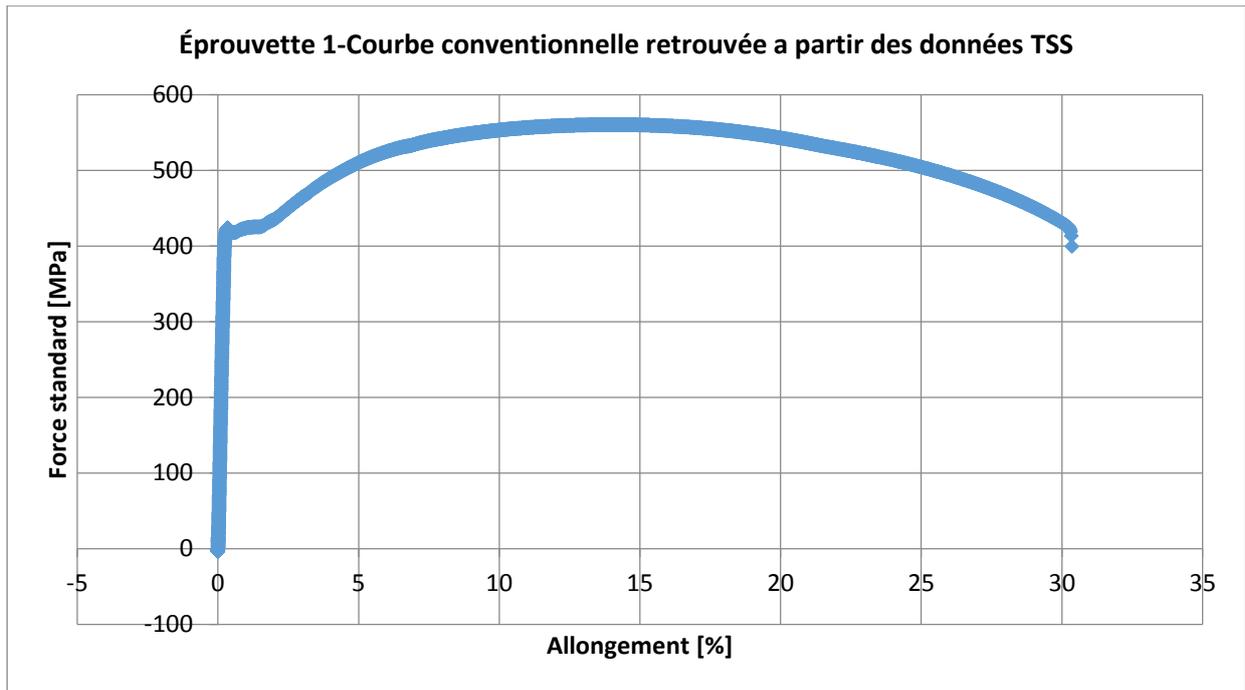


Figure 36 : Courbe conventionnelle retrouvée à partir des données TSS

La Figure (36) représente la courbe conventionnelle Force-Déplacement dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS. La courbe confirme le comportement élastoplastique du matériau.

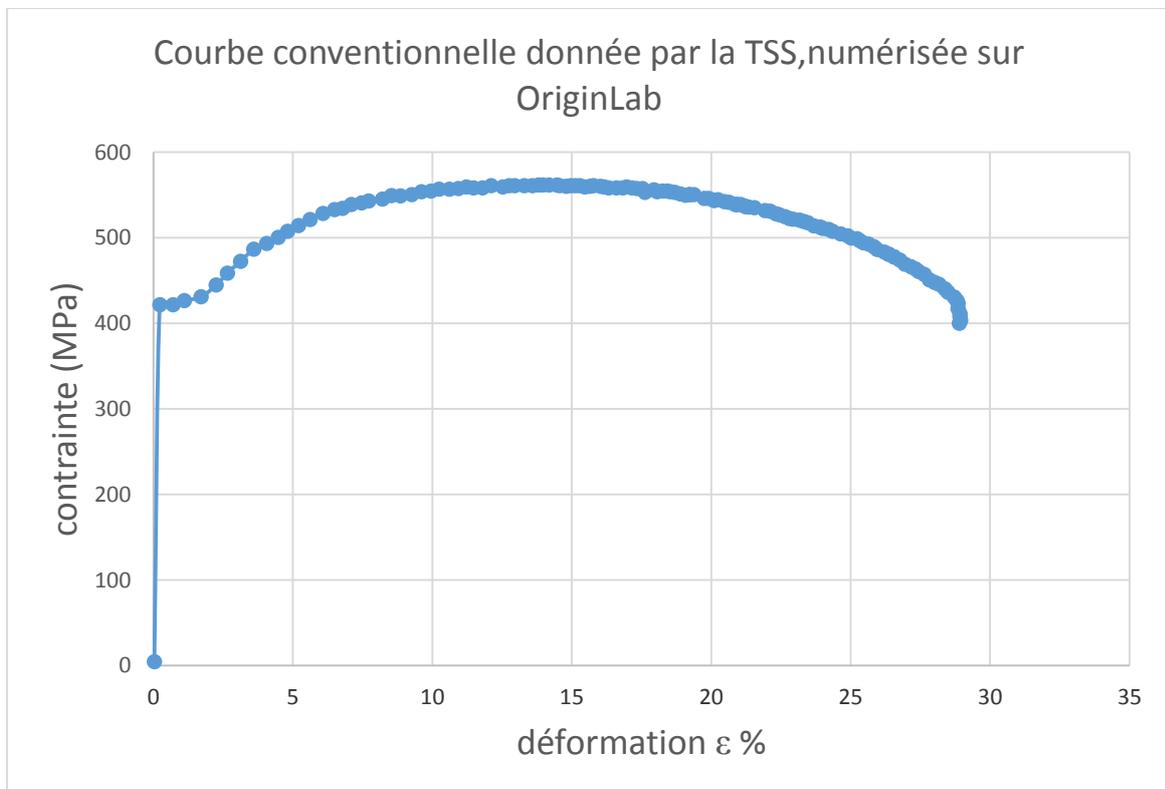


Figure 37 : Courbe conventionnelle donnée par la TSS, numérisée sur OriginLab.

La Figure (37) représente la courbe conventionnelle Contrainte-déformation donnée par la TSS et numérisé en vue d'obtenir la courbe expérimentale. Les points de la courbe sont obtenus grâce au Logicielle OriginLab9.

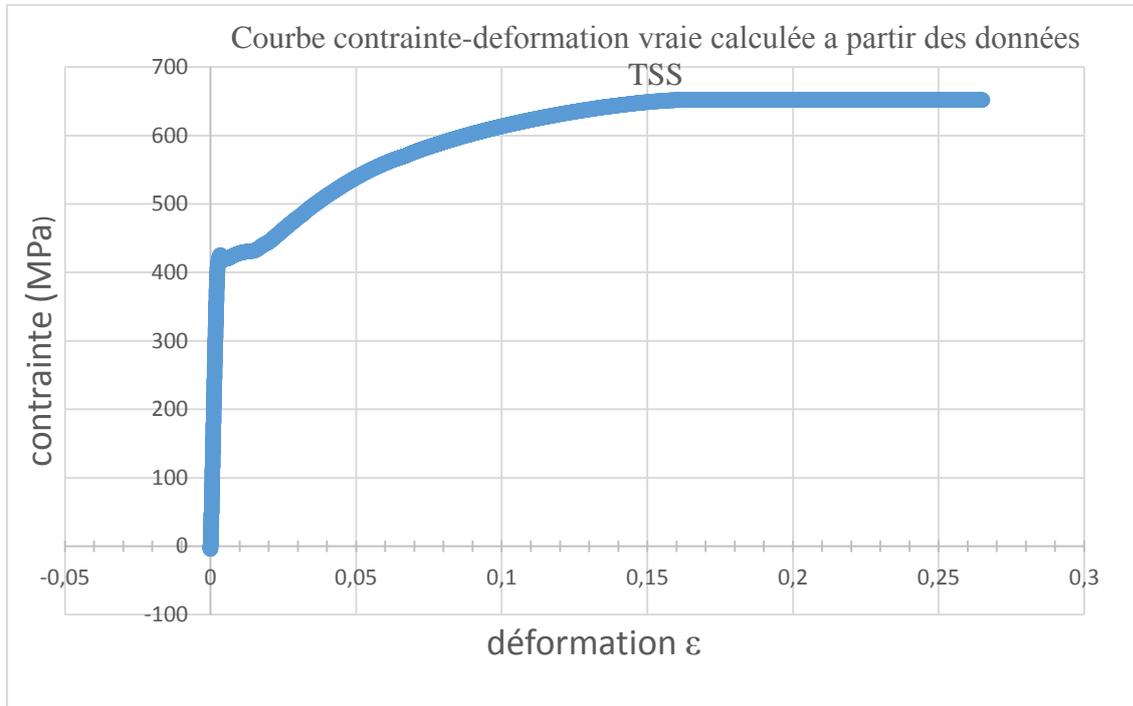


Figure 38: Courbe contrainte déformation vraie calculée à partir des données TSS

La Figure (38) représente la courbe Contrainte-déformation vraie dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS.

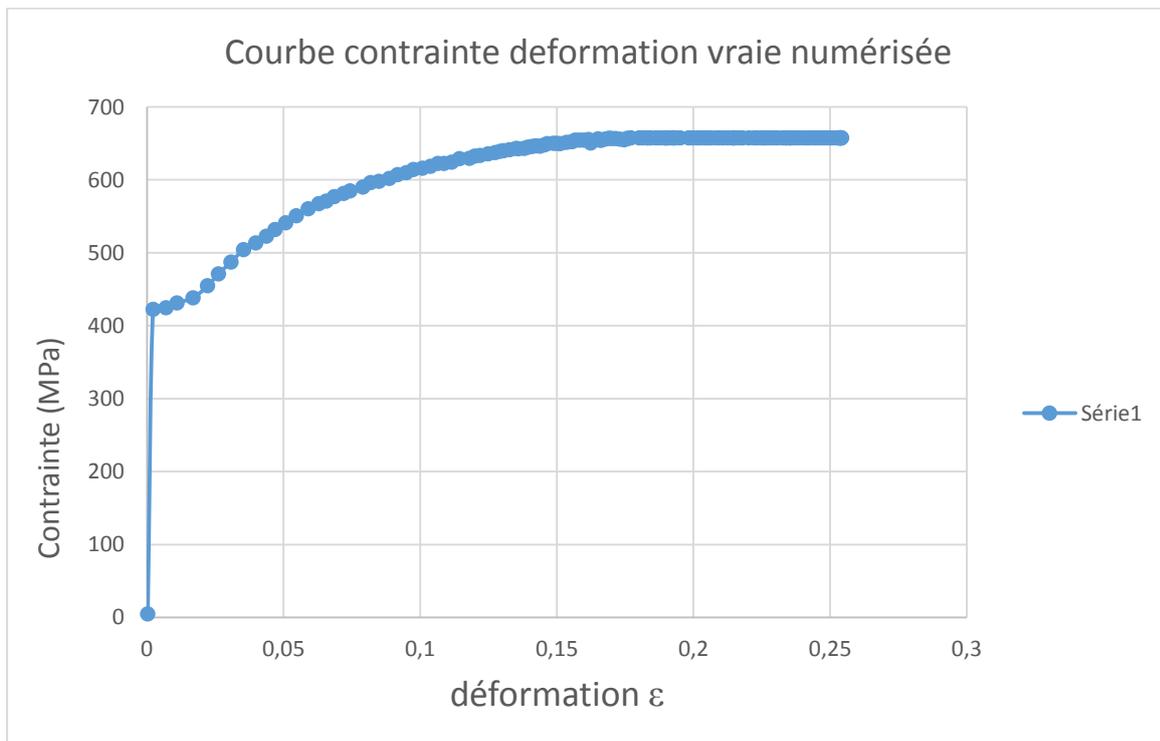


Figure 39: Courbe contrainte déformation vraie numérisée

La Figure (39) représente la courbe Contrainte-déformation vraie calculée à partir de la courbe conventionnelle numérisée dont les valeurs de l'essai sont fournies par Logicielle OrigineLab9.

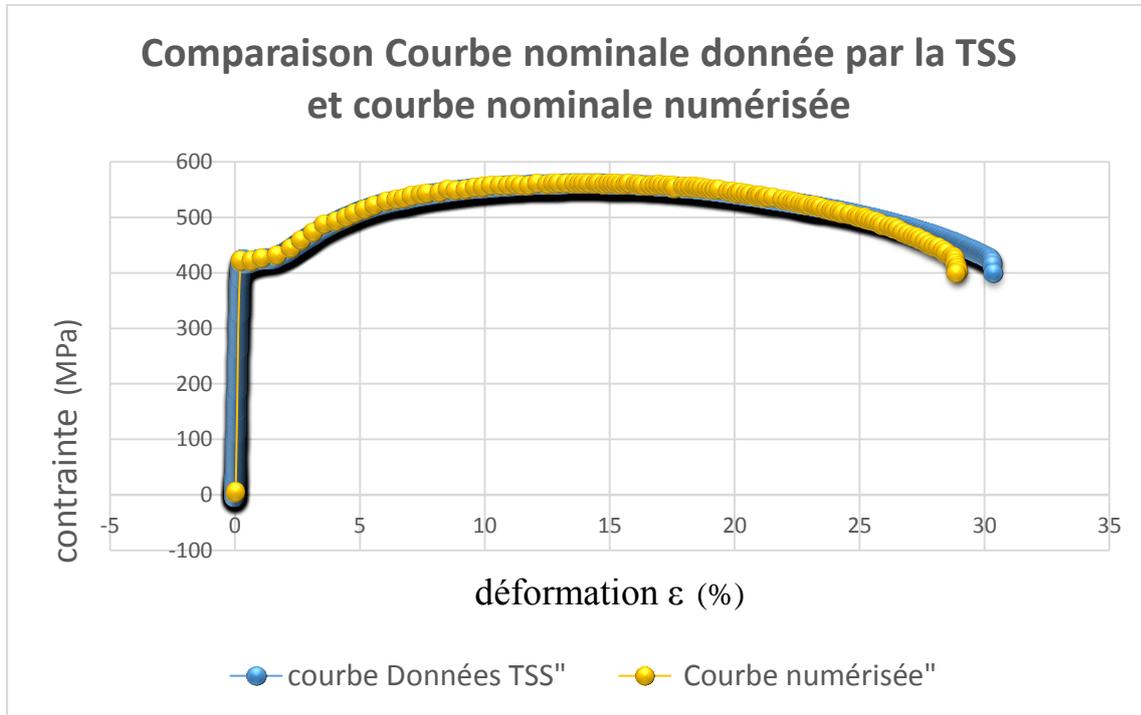


Figure 40 : Comparaison courbe nominale donnée par la TSS et courbe nominale numérisée.

La Figure (40) montre une superposition quasi parfaite des 2 courbes. Ce qui confirme l'allure de la courbe conventionnelle du matériau dans les 2 cas

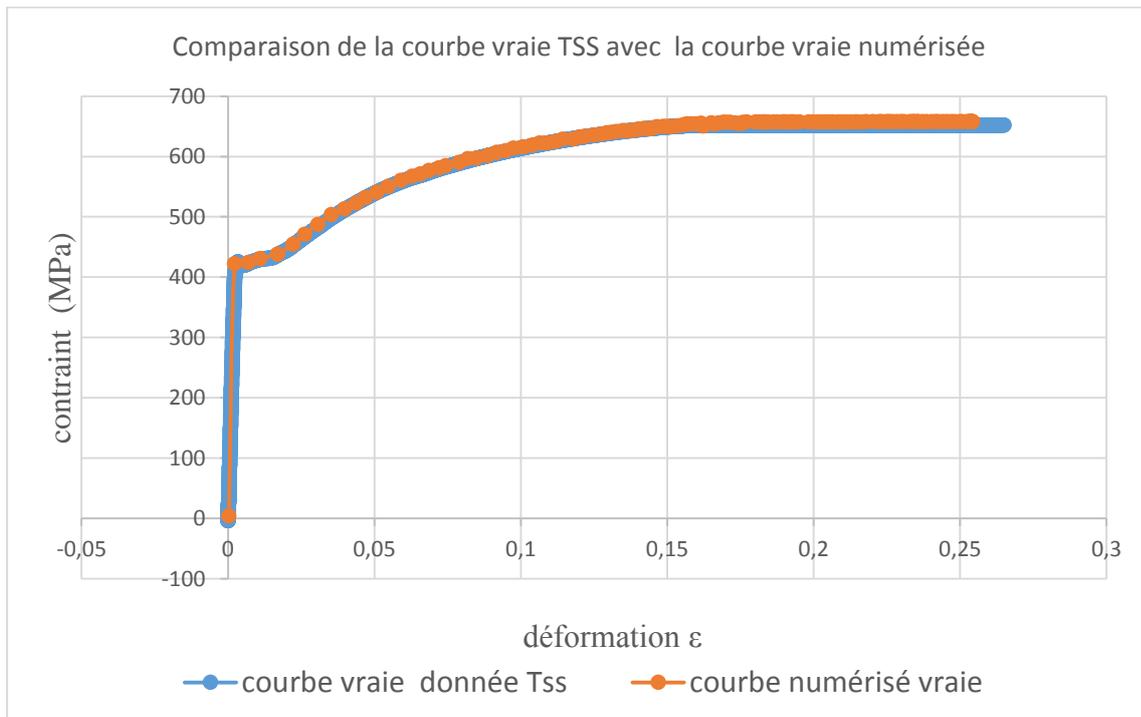


Figure 41 : Comparaison de la courbe vraie TSS avec la courbe vraie numérisée.

La Figure(41) montre une superposition quasi parfaite des 2 courbes. Ce qui confirme l'allure de la courbe vraie du matériau dans les 2 cas

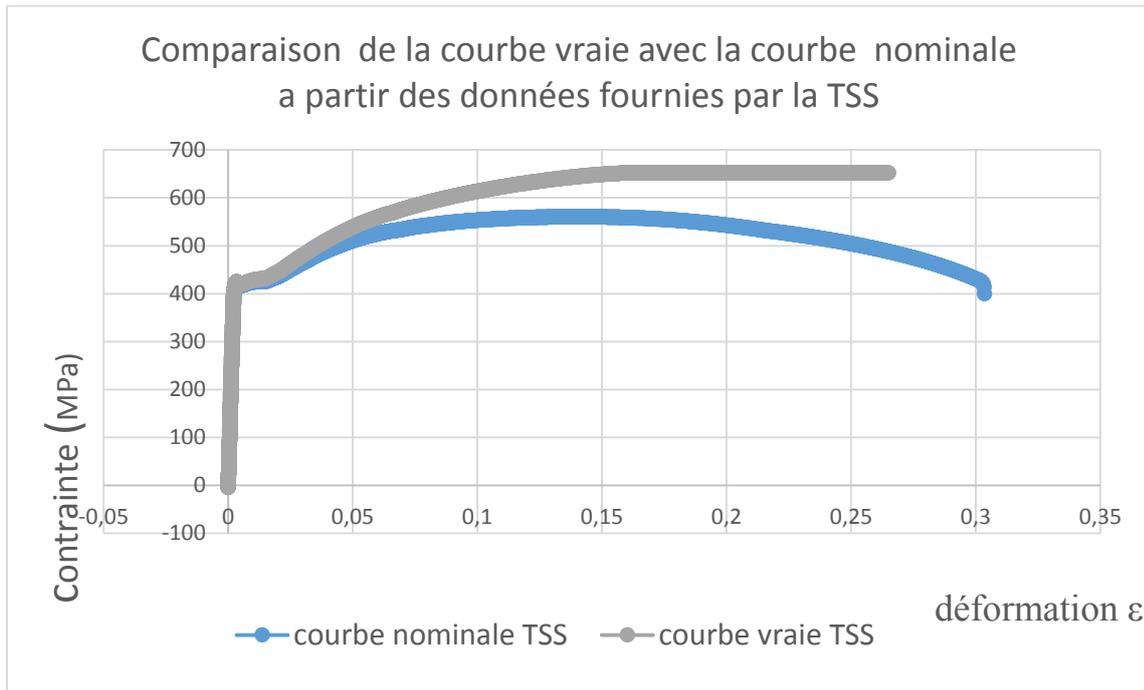


Figure 42 : Comparaison de la courbe vraie avec la courbe nominale à partir des données fournies par la TSS

La Figure(42) montre la différence entre la courbe rationnelle du matériau et la courbe conventionnelle retrouvée à partir des données de la TSS

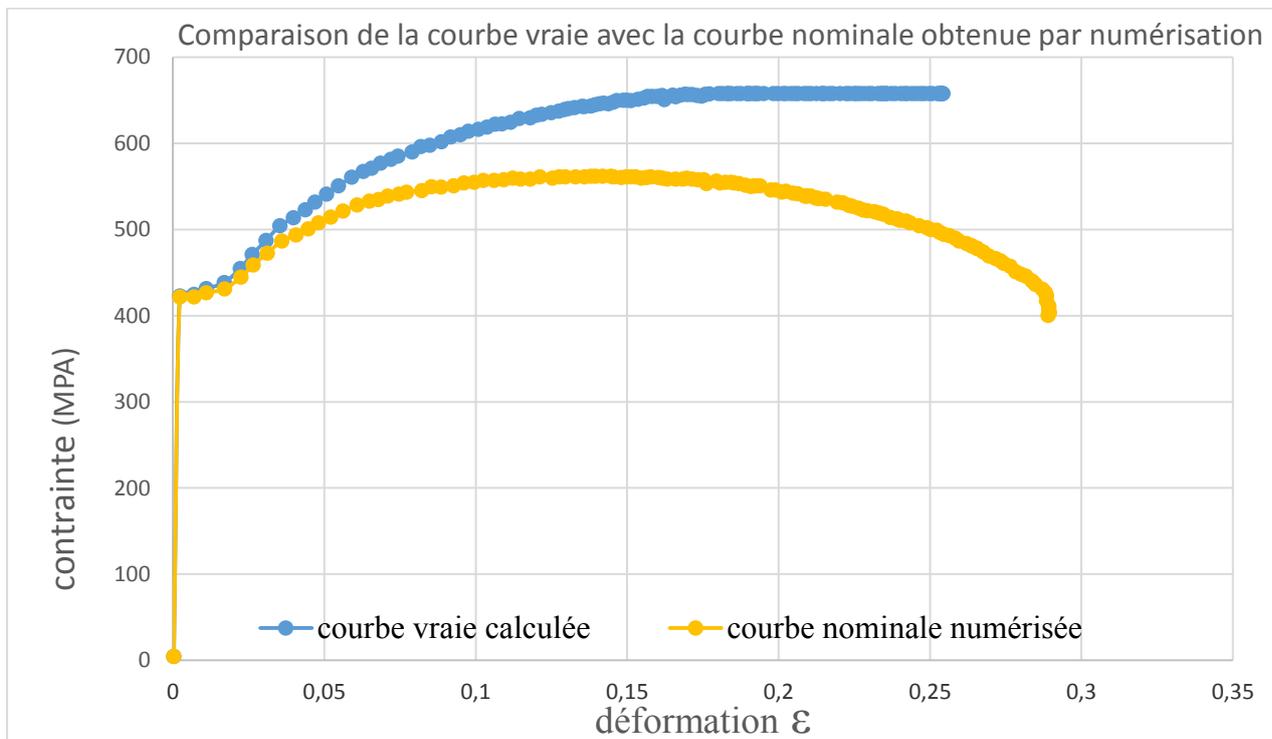


Figure 43 : Comparaison de la courbe vraie avec la courbe nominale obtenue par numérisation

La Figure(43) montre la différence entre la courbe rationnelle du matériau et la courbe conventionnelle retrouvée

III.7.2. Conclusion :

En vue d'une représentation des courbes conventionnelles et rationnelles ; les valeurs ayant permis de tracer ces courbes sont nécessaires pour la détermination de ces courbes. Donc une numérisation des courbes fournies par la TSS a été réalisée ; à partir de la courbe conventionnelle Force-Déplacement dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS ; à partir desquelles des courbes Contraintes déformations rationnelles ont été déduites. Les courbes retrouvées confirme le comportement élastoplastique du matériau et les limites de la déformation plastique jusqu'à rupture



Chapitre IV

Simulation et Résultats

IV.1 Introduction :

L'aptitude des pièces au cours de la mise en service et la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau peuvent être envisagées aujourd'hui sans recourir aux procédés classiques, grâce aux puissants outils de calcul et de simulation. La simulation numérique, permet actuellement de visualiser virtuellement le comportement du métal dans l'outil et entreprendre des analyses quasi quantitatives sur des modèles représentatifs de pièces réelles. Le développement de ces méthodes a favorisé l'utilisation de logiciels industriels permettant la simulation des essais, pouvant se substituer entièrement ou en partie à l'expérimentation coûteuse. Ces méthodes nous épargnent la mise au point de prototypes, et nous permettent une prise de décision facile, d'où un gain de temps et de coût.

Les progrès des méthodes numériques et l'augmentation des performances des ordinateurs permettent grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement des systèmes complexes. L'industrie utilise de plus en plus la simulation numérique, validée par des expériences.

Les simulations numériques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique 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 comportement. Contrairement à la modélisation analytique, concevoir un type de modèle de comportement représentatif du comportement du matériau considéré en reproduisant les conditions réelles de sollicitation, ne renvoie pas souvent aux modèles préalablement mis au point.

La simulation d'une pièce sous pression réalisée sur le logiciel abaqus tenant compte des conditions expérimentales permet d'établir une caractérisation du matériau et de son comportement. Ainsi, les résultats demeurent significatifs pour le seul cas correspondant aux choix des hypothèses considérées. Le logiciel Abaqus, permettant la variation des paramètres opérationnels et la variation des critères pouvant agir sur l'apparition de certaines irrégularités de la pièce finie, conduit à des résultats plus variés que les démarches expérimentales.

Différents scénarios de simulation seront considérés de manière à optimiser le résultat de la simulation. Le résultat optimal sera le fruit d'un compromis entre tous les paramètres.

IV.2 Caractéristiques du logiciel de simulation :

Le logiciel ABAQUS utilisé ici, a été développé depuis le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de la recherche.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation. ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Il est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb. Deux tâches restent à accomplir: générer le fichier de données et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb. La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, les matériaux, les chargements, etc..., suivant une syntaxe précise.

Les Modules :

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

Le module « PART ».

Le module Part permet de créer le dessin du tube en 2D

Le module « PROPERTY ».

Le module Property permet, de définir toutes les propriétés élastiques et plastiques du matériau du matériau.

Le module « ASSEMBLY ».

Ce module permet si il ya lieu d'assembler les différents objets géométriques.

Le module « STEP ».

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

Le module « INTERACTION ».

Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres.

Le module « LOAD ».

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

Le module « MESH ».

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

Le module « JOB ».

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

Le module « VISUALIZATION ».

Ce module permet de visualiser **le modèle** et les résultats, les courbes de charges, et les déformations.

IV.3 Concept de la simulation :

Le logiciel dispose d'un moyen efficace de prédire par la simulation numérique l'apparition des ruptures dans un tube. Une nouvelle fois, la technique d'analyse d'images s'avère utile et elle est utilisée ici pour observer et comprendre les manifestations de certains phénomènes. Des considérations assez simples permettent finalement non pas de déterminer les conditions d'apparition d'un défaut ou une irrégularité mais suivre l'évolution du défaut lors de la simulation numérique et permet d'étudier minutieusement le déroulement du comportement du matériau lors de l'apparition des instabilités plastiques.

La simulation concerne un morceau de tube sur lequel est appliquée une pression hydrostatique intérieure en vue de déterminer la résistance et la répartition des contraintes et des déformations qui peuvent entraîner une rupture.

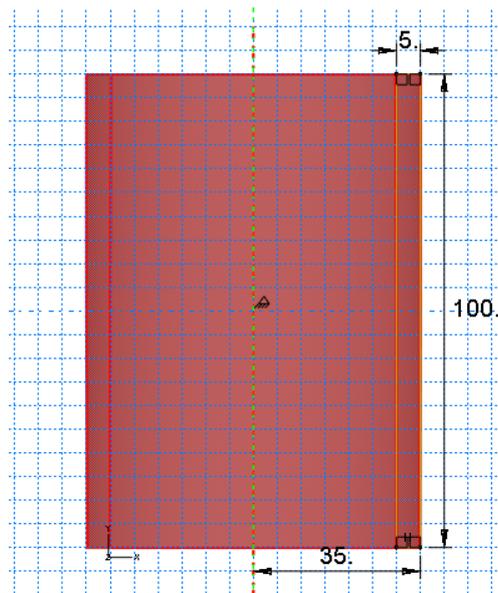


Figure 44 : Dessin de définition du tube

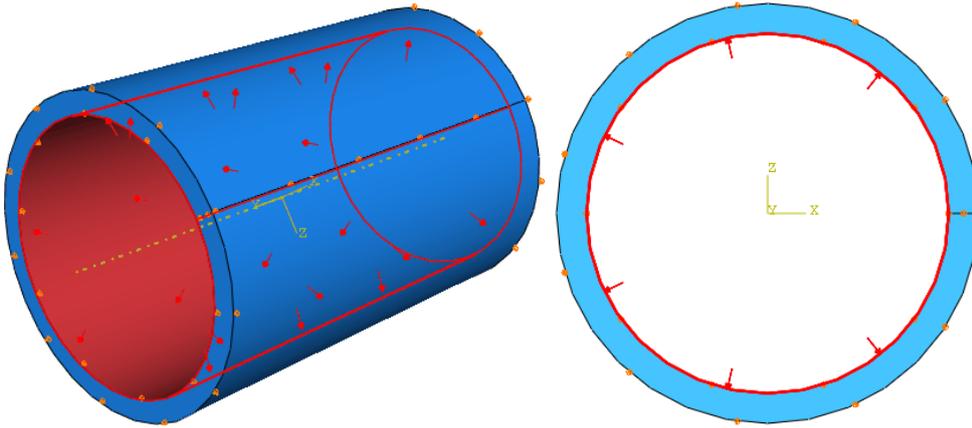


Figure 45 : Surface d'application de la pression

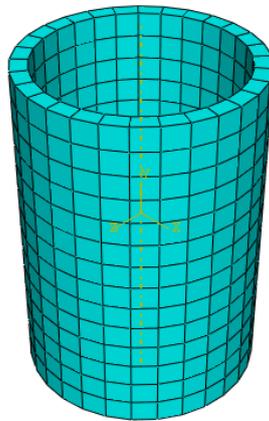


Figure 46 : Maillage du tube en CD8R

IV.4 Exploration des Résultats :

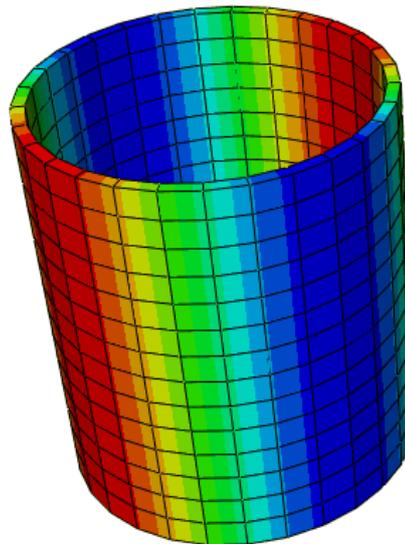
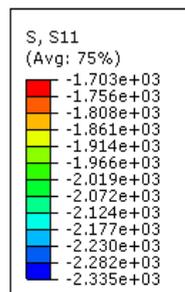


Figure 47 : Répartition des contraintes sur l'épaisseur du tube

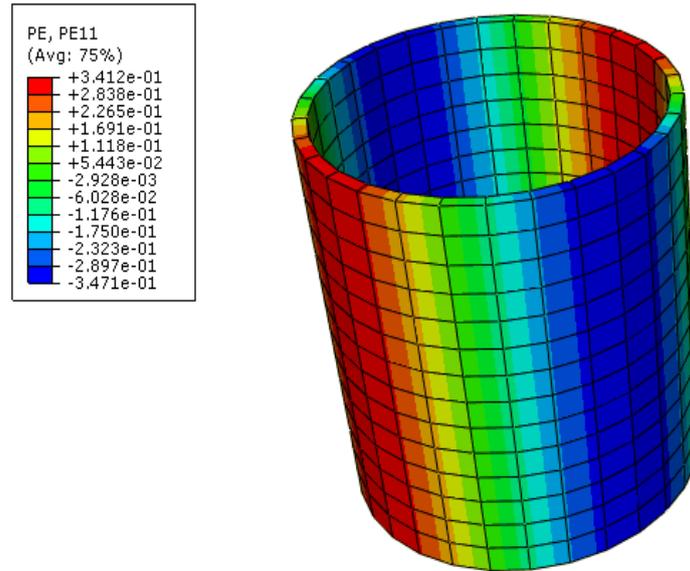


Figure 48 : Répartition de déformations plastiques sur l'épaisseur du tube

IV.4.1 Résultats de la simulation :

Calcul de l'épaisseur " e " et de la longueur " L " des éléments suivant l'axe horizontal 1 au cours de la déformation du tube soumis à une pression intérieure $P= 500 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$

On a rapporté dans les figures suivantes seulement la déformation $PE11=\epsilon_1$ dans le sens de l'axe horizontale 1 état initiale du tube sans déformation

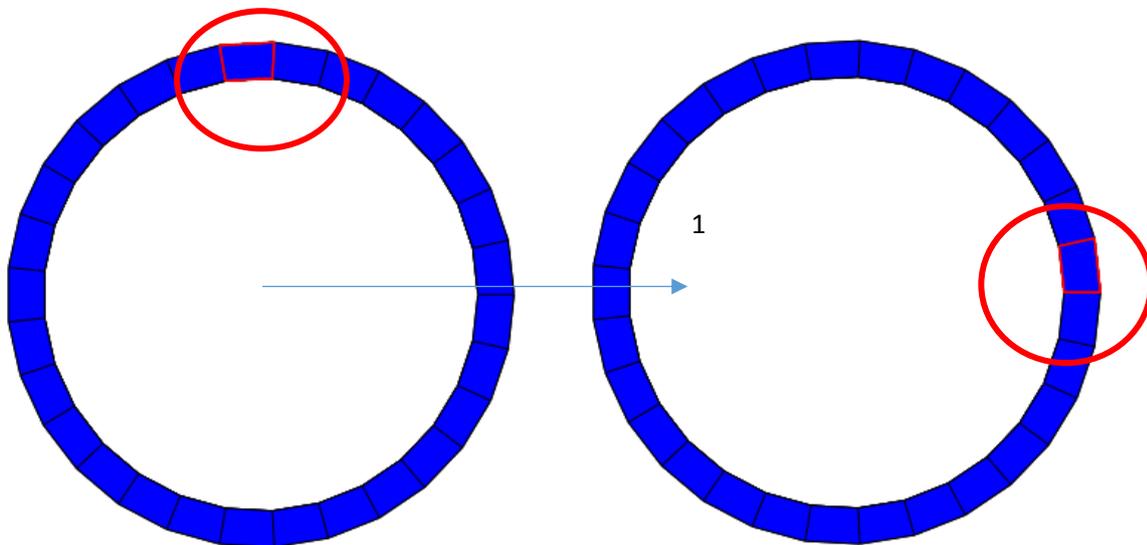


Figure 49 : Choix des éléments concernés par la déformation PE11 sur la section

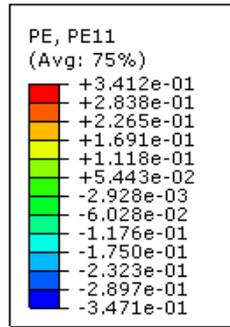
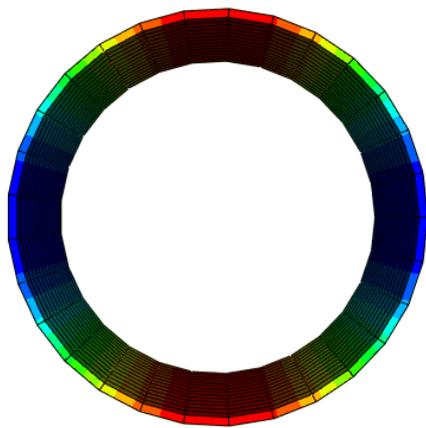
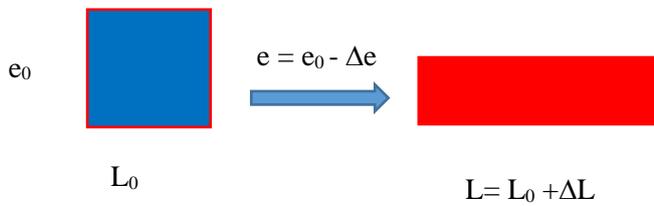


Figure 50 : Répartition de la déformation
Plastique le long du tube

Figure 51 : Répartition de la déformation
plastique sur la section du tube

Déformation de l'élément rouge



Longueur
 $L_0=5$ $L > L_0$ Traction

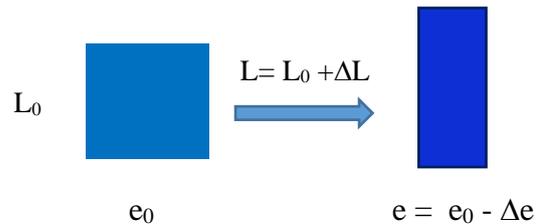
$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$$

$$L = \varepsilon L_0 + L_0$$

$$L = L_0(\varepsilon + 1)$$

$$L = L_0(1 + \varepsilon)$$

déformation de l'élément bleu



épaisseur
 $e_0=5$ $e < e_0$ compression

$$\varepsilon = \frac{e-e_0}{e_0}$$

$$e = \varepsilon e_0 + e_0$$

$$e = e_0(\varepsilon + 1)$$

$$e = e_0(1 + \varepsilon)$$

IV.4.2 Calcul de la Longueur et de l'épaisseur de l'élément en fin de déformation :

$\varepsilon_{11}=0$ $e_0=5$; $L_0=5$

$$\varepsilon = +0,34$$

$$L = 5(1 + 0,34)$$

$$L = 6,7\text{mm}$$

$$\varepsilon = -0,34$$

$$e = 5(1 - 0,34)$$

$$e = 3,3\text{mm}$$

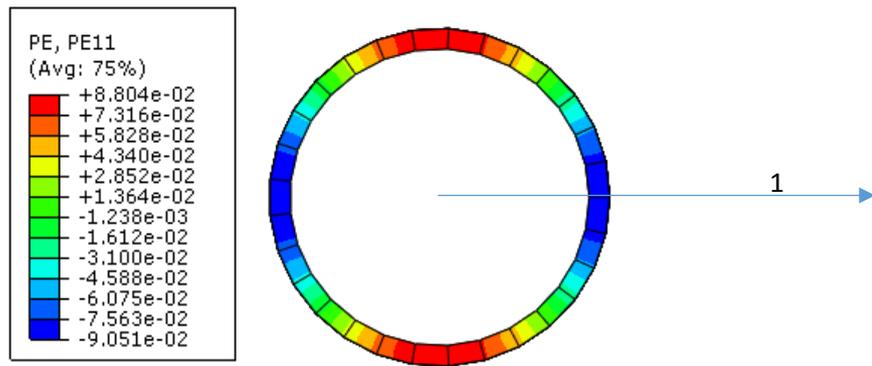


Figure 52 : État du tube au moment de la première de déformation

Déformation suivant l'axe 1

$\epsilon_{11}=+0,08$ $L=5,4$

$\epsilon_{11}=-0,09$ $e=4,5$

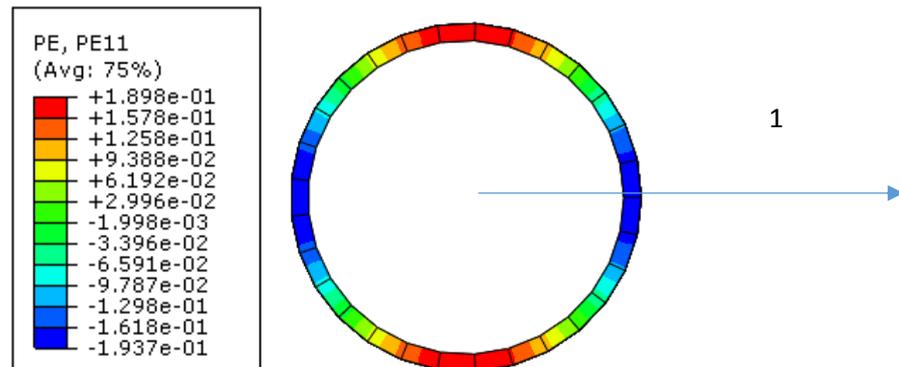


Figure 53 : État du tube au moment de la deuxième de déformation

Déformation suivant l'axe 1

$\epsilon_{11}= +0,18$ $L=5,9$

$\epsilon_{11}= -0,19$ $e=4,05$

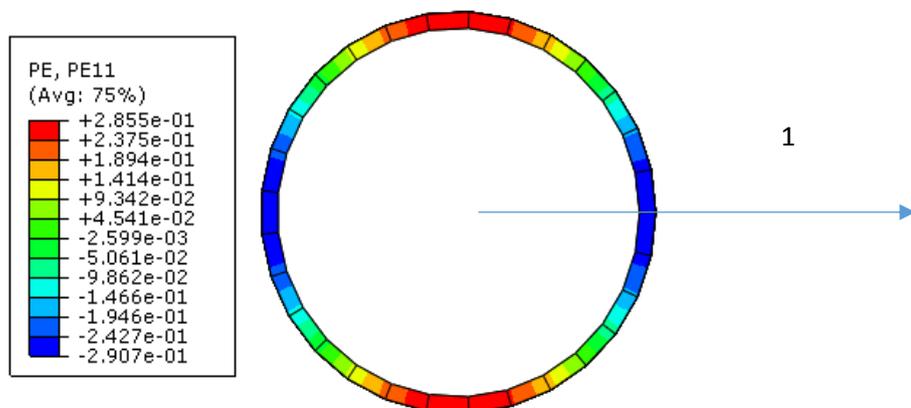


Figure 54 : État du tube au moment de la 3e de déformation

Déformation suivant l'axe 1

$\epsilon_{11} = +0,28$ $L=6,4$

$\epsilon_{11} = -0,29$ $e=3,55$

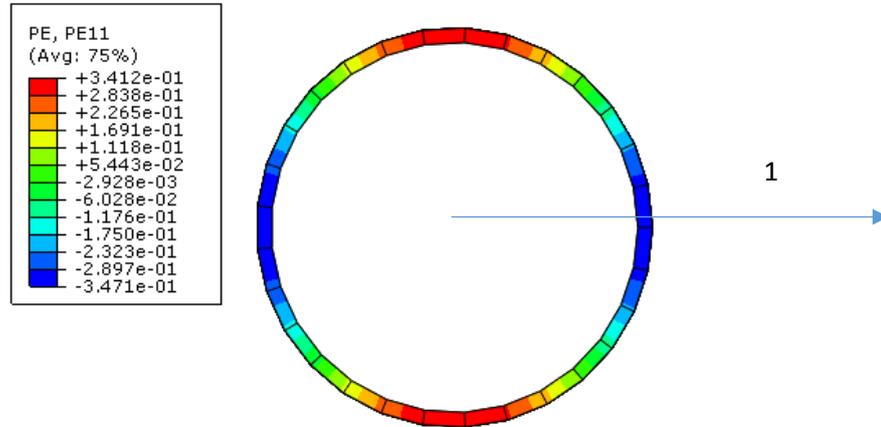


Figure 55: État du tube au moment de la déformation à la rupture

Déformation suivant l'axe 1

$\epsilon_{11} = +0,34$ $L=6,7$

$\epsilon_{11} = -0,34$ $e=3,3$

IV.4.3. Conclusion :

La simulation d'un tube sous pression réalisée sur le logiciel abaqus tenant compte des conditions de service a permis d'établir le comportement du tube aux différentes sollicitations et une caractérisation du matériau. Le logiciel Abaqus, permettant la variation des paramètres opérationnels et la variation des critères pouvant agir sur l'apparition de certaines irrégularités dans les tubes, a permis de recueillir des résultats plus variés que les démarches expérimentales.

La simulation a concerné un morceau de tube sur lequel est appliquée une pression hydrostatique intérieure ; ce qui a permis de tester la résistance du tube et la répartition des contraintes et des déformations qui peuvent entraîner une rupture. Le modèle de simulation a permis de déduire l'évolution de l'épaisseur au fur et à mesure de l'augmentation de la pression.



Conclusion

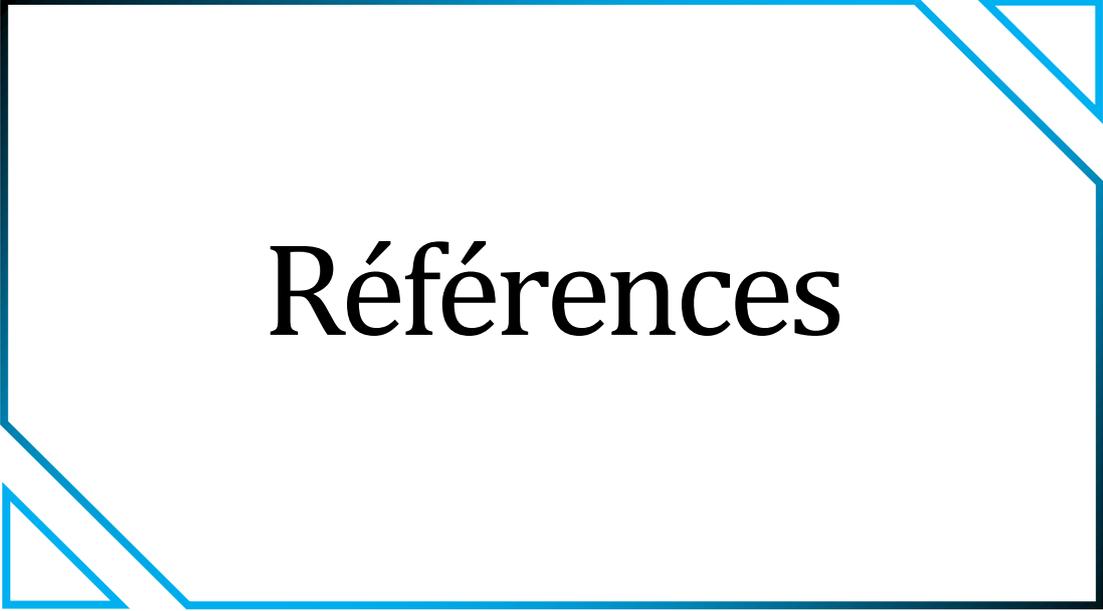
Conclusion

Le présent travail propose une analyse des caractéristiques mécaniques d'un acier pour tube destiné au transport des hydrocarbures. Il vient en complément d'un stage de fin d'études, réalisé au niveau de l'unité de production des tubes Aciers sans soudures d'Arcelor Mittal.

En vue d'une représentation des courbes conventionnelles et rationnelles ; les valeurs ayant permis de tracer ces courbes sont nécessaires pour la détermination de ces courbes. Donc une numérisation des courbes fournies par la TSS a été réalisée ; à partir de la courbe conventionnelle Force-Déplacement dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS ; à partir desquelles des courbes Contraintes déformations rationnelles ont été déduites. Les courbes retrouvées confirme le comportement élastoplastique du matériau et les limites de la déformation plastique jusqu'à rupture

La simulation d'un tube sous pression réalisée sur le logiciel abaqus tenant compte des conditions de service a permis d'établir le comportement du tube aux différentes sollicitations et une caractérisation du matériau. Le logiciel Abaqus, permettant la variation des paramètres opérationnels et la variation des critères pouvant agir sur l'apparition de certaines irrégularités dans les tubes, a permis de recueillir des résultats plus variés que les démarches expérimentales.

La simulation a concerné un morceau de tube sur lequel est appliquée une pression hydrostatique intérieure ; ce qui a permis de tester la résistance du tube et la répartition des contraintes et des déformations qui peuvent entraîner une rupture. Le modèle de simulation a permis de déduire l'évolution de l'épaisseur au fur et à mesure de l'augmentation de la pression.



Références

Références

- [1] : MECHERNENE Abderrahim mémoire « Étude de comportement en fatigue des aciers pour les pipeline université Tlemcen 2013.
- [2] : Article de –caractéristiques et choix des matériaux.
- [3] : Article de –comportement des matériaux.
- [4] : [Http://www.protem.fr/actualites/78-lesmatériaux-utilises -dans-la-fabrication-des-tubes-et-leur-usinabilité](http://www.protem.fr/actualites/78-lesmatériaux-utilises-dans-la-fabrication-des-tubes-et-leur-usinabilité)
- [5] : <http://www.techno-science.net/?Onglet=glossaire&definition=4712>.
- [6] : Saïd Hariri, Mansour Afzali & Haïdar Jaffal « Nocivite des défauts et propagation de fissures dans les équipements sous pression ». Ecole des Mines de Douai 2007
- [7] : Ouahabi, Thomas et Lakis « Détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps fréquence ». Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure .Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada, 2008.