

Faculté des Sciences de l'ingénierie
Département de génie mécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

INTITULÉ

**Caractérisation de l'acier X 52Q et simulation du
comportement du tube en service**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPECIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PRÉSENTE PAR : SAHOUR MOUNIR

DIRECTEUR DE MÉMOIRE : Pr. BOUSSAID. O U. Annaba

DEVANT LE JURY :

PRÉSIDENT : Pr. HAMADACH.H U. Annaba

EXAMINATEURS : Dr. NAHAL. A U. Annaba

Juin : 2020

TABLE DES MATIERES

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction	1

Chapitre I : Comportement des matériaux et essais mécaniques

I.1. Introduction	3
I.2. Caractérisation des propriétés mécaniques	3
I.2.1. Les essais peu liés au temps	4
I.2.2. Les essais fortement liés au temps	4
I.3. Lois de comportement des métaux	4
I.3.1. Élasticité	5
I.3.2. Élastoplasticité, Viscoplasticité	6
I.3.3. Détermination des propriétés élastoplastique	6
I.3.3.1 Définition d'un comportement élastoplastique	6
I.3.3.2 Critères de plasticité	7
I.4. Caractéristiques des aciers	9
I.5. Intérêt et nécessité des essais mécaniques	9
I.5.1. Essai de traction	10
I.5.1.1. Les éprouvettes	10
I.5.1.2. Machines d'essais	12
I.5.1.3. Diagramme de traction	12
I.5.1.4. Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction	13
I.5.2. Essais de résilience	15
I.5.2.1. Principe de l'essai Charpy	15
I.5.2.2. Calcul et expression des résultats	16
I.5.3. Essais de dureté par pénétration	16
I.5.3.1. Principe et relations générales	16
I.5.3.2. Essai de dureté Brinell	18
I.5.3.3. Essai de dureté Rockwell	19

I.5.3.4. Essai de dureté Vickers.....	19
I.5.4. Intérêt et application des essais d'indentation.....	20
I.6. Conclusion.....	22

Chapitre II : Essais expérimentaux

II.1. Introduction.....	23
II.2 Essais utilisés pour la caractérisation.....	23
II.2.1 Analyse chimique.....	23
II.2.1.1 Préparation des échantillons.....	24
II.2.2 Essai de traction.....	24
II.2.2.1 Préparation des éprouvettes.....	24
II.2.2.2 Machine d'essai de traction.....	26
II.2.2.3 Conditions de réalisation de l'essai.....	26
II. 2. 3 Essais de résilience.....	27
II.2. 3.1 Préparation et dimensionnement de l'éprouvette.....	27
II.2. 3.2 Machine d'essai résilience.....	29
II.2. 3. 3 Conditions de réalisation de l'essai.....	29
II.2. 3. 4 Déroulement de l'essai de choc Charpy traditionnel.....	29
II. 2. 4 Essais de dureté Vickers.....	30
II.2. 4. 1 Préparation et dimensionnement de l'échantillon.....	30
II. 2.4. 2 Appareil d'essai de dureté.....	31
II.2. 4. 3 Conditions de réalisation de l'essai.....	31
II. 3 Conclusion.....	32

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Présentation du matériau.....	33
III.2 Analyse chimique.....	34
III.3 Essai de traction.....	34
III.3.1 Courbes Contrainte-Allongement TSS et résultat.....	35
III.3.2 Analyse des résultats des essais de traction.....	36
III.3.3 Comparaison entre la courbe TSS et la courbe vraie calculée.....	39
III.3.4 Comparaison de la limite élastique et la résistance max avec les limites de la fourchette.....	41
III.4 Essai de résilience.....	42
III. 5 Essai de dureté Vickers.....	44

III. 6 Conclusion	45
Chapitre IV : Simulation du tube TSS en service	
IV.1. Présentation du logiciel ABAQUS	46
IV.1.1. Logiciels sur le marché.....	46
IV.1.2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS.....	46
IV.2. Simulation numérique	47
IV.3 Exploration des Résultats	50
IV.3.1 Résultats de la simulation.....	50
IV.3.2 Calcul de l'épaisseur de l'élément en fin de déformation.....	52
IV.4 Conclusion	55
Conclusion	56
Référence	

DEDICACES

Je dédie ce travail de fin d'études :

A la mémoire de ma mère qui n'a pas cessé de croire en moi, malgré ton absence je

te dois tous mes remerciements

A Mon Père

A ma femme et ma petite KHADIJA

A toute ma famille.

A tous mes amis et Tous ceux que nous aimons et qui nous aiment

A tout le personnel de SIDER TSS

Au directeur de mémoire Pr. BOUSSAID.O

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer nos plus vifs Remerciements à ALLAH « tout puissant » pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'étude pour que nous puissions arriver à ce jour.

Un grand remerciement à tous qui se sont investis à l'aboutissement de ce projet En leur offrant toutes mes sincères gratitudes en premier.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude à notre Directeur de mémoire Pr. BOUSSAID.O pour ses orientations et ses précieux conseils durant l'élaboration de ce travail.

Je remercie l'ensemble d'enseignants qui ont contribué à notre formation et surtout les enseignants du département de Métallurgie.

En fin, nous tenons à exprimer nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail sans oublier les membres de jury.

Liste des figures

Chapitre I : Comportement des matériaux et essais mécaniques

Figure I.1	Dimension d'éprouvette de traction.....	12
Figure I.2	la machine de traction.....	12
Figure I.3	diagramme de traction.....	13
Figure I.4	Géométrie des éprouvettes Charpy entaillées en V.....	15
Figure I.5	Principe et géométrie de l'essai.....	16
Figure I.6	Principe de dureté brinell.....	18
Figure I.7	Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle <i>HRC</i> , b) échelle <i>HRB</i>	19
Figure I.8	Principe de dureté Vickers.....	20

Chapitre II : Essais expérimentaux

Figure II.1	Spectromètre Thermo Fisher.....	23
Figure II.2	Echantillons pour analyse chimique.....	24
Figure II.3	Echantillons après bombardement	24
Figure II.4	Méthode de prélèvement des éprouvettes et échantillons.....	25
Figure II.5	Préparation des éprouvettes.....	25
Figure II.6	Éprouvette Avant essai (acier API-X52 Selon la Norme API 5L).....	25
Figure II.7	Machine de traction <i>Z1200 ZWICK/ROELL 120To</i>	26
Figure II.8	Fin de traction.....	26
Figure II.9	Éprouvette de traction de l'acier API-X52Q après essai.....	27
Figure II.10	position de l'éprouvette de résilience.....	27
Figure II.11	Coupe des éprouvettes sur scie mécanique.....	28
Figure II.12	géométrie des éprouvettes.....	28
Figure II.13	Préparation des entailles.....	28
Figure II.14	Mouton Charpy V.....	29
Figure II.15	Déroulement de l'essai de résilience.....	30
Figure II.16	échantillons après essai	30
Figure II.17	échantillon de dureté.....	31
Figure II.18	Appareil d'essai de dureté.....	31
Figure II.19	Mesure incorrecte (résultat erroné).....	32
Figure II.20	Mesure correcte (résultat juste).....	32

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1	Géométrie de tube.....	33
Figure III.2	Éprouvette de traction de l'acier API-X52 après essai.....	34
Figure III.3	Courbes Contrainte-Allongement des 6 Échantillons prélevés des tubes.....	35
Figure III.4	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 01.....	36
Figure III.5	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 02.....	37
Figure III.6	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 03.....	37
Figure III.7	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 04.....	38
Figure III.8	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 05.....	39
Figure III.9	Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 06.....	39
Figure III.10	Comparaison entre courbe conventionnelle et rationnelle.....	40
Figure III.11	Comparaison des valeurs de $R_{p0.05}$ par éprouvette.....	41
Figure III.12	Comparaison des valeurs de R_m par éprouvette.....	41
Figure III.13	Evolution de la résilience en fonction de la température.....	43

Chapitre IV : Simulation du tube TSS en service

Figure IV. 1	Création du tube.....	47
Figure IV. 2 :	Tube vert après la définition des propriétés du matériau.....	48
Figure IV. 3 :	Présentation de Conditions aux limites de la structure Etudiée et l'application des charges.....	49
Figure IV. 4	maillages du tube sous pression interne.....	49
Figure IV.5	Répartition des contraintes sur l'épaisseur du tube.....	50
Figure IV.6	Répartition de la déformation plastique sur tube.....	51
Figure IV.7	Choix d'élément concerné par la déformation PE11 sur la section... ..	51
Figure IV.8	Répartition de la déformation plastique sur la section du tube... ..	52
Figure IV.9	État du tube au moment de la première de déformation.....	52
Figure IV.10	État du tube au moment de la deuxième de déformation..... ..	51
Figure IV.11	État du tube au moment de la déformation à la rupture.....	53

Liste des Tableaux

Chapitre I : Comportement des matériaux et essais mécaniques

Tableau I.1.	Comparaison entre les méthodes par pénétration.....	21
--------------	---	----

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1	Exigences Propriétés mécaniques de l'acier X52Q.....	33
Tableau III.2	Exigences composition chimique pour Grade X52Q.....	34
Tableau III.3	Résultat composition chimique de l'acier API 5L Grade X 52 Q.....	34
Tableau III.4	Résultats d'essai de traction.....	36

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. Le sujet porte sur la caractérisation des tubes sans soudures de matériau X52Q.

Les essais effectués au laboratoire ont permis de la détermination des courbes de traction 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.

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.

Mots Clés : essais mécaniques, acier, comportement élastoplastique, simulation abaqus.



Introduction



Introduction

La caractérisation mécanique des matériaux constitue une étape importante dans le domaine de l'ingénierie mécanique. En effet, le choix d'un matériau pour un usage spécifique passe nécessairement par des caractérisations dont l'objectif est d'accéder aux différentes grandeurs caractéristiques de résistance mécanique qui permettent de positionner le matériau en question parmi d'autres matériaux candidats à cet usage. Parmi ces caractéristiques, on cherche souvent à déterminer, dans les conditions d'usage du matériau, la résistance mécanique, souvent désignée par rigidité et exprimée par le module de Young, la limite élastique (contrainte provoquant un début de déformation « permanente »), la dureté du matériau (sa résistance à la pénétration) et la résistance au choc (résilience).

Ces caractéristiques macroscopiques traduisent en fait un ensemble de comportements du matériau à l'échelle microstructurale, ensemble découlant d'interactions à plus basse échelle. Ces interactions étant sensibles au paramètre température vu que l'agitation thermique provoque des modifications de structure à cette échelle, il en découle une modification des propriétés mécaniques du matériau. Cette influence du paramètre température sur le comportement mécanique d'un matériau fut l'une des premières découvertes de l'homme puisqu'il a su fabriquer, dès l'âge de bronze, des armes, outils et autres objets en chauffant puis en déformant le matériau utilisé.

Ce n'est que dans la période de la Renaissance, puis dans la Révolution industrielle, que certains aspects de la connaissance du comportement des matériaux à différentes températures sont étudiés. A titre d'exemple, c'est suite aux disparitions de bateaux dans les eaux très froides du nord de l'océan atlantique que les scientifiques ont étudié le comportement des matériaux métalliques à basses températures et mis en évidence un phénomène de fragilisation de l'acier dans de telles conditions de température. Les études de la caractéristique de fragilité-ductilité du matériau ont été menées, dans un premier temps, en recourant à des dispositifs expérimentaux rudimentaires. Parmi les premiers savants à avoir proposé un dispositif permettant l'obtention de résultats suffisamment fiables, Georges Charpy a conçu un pendule-mouton permettant d'impacter brusquement une éprouvette entaillée au niveau de la zone d'entaille de telle sorte à provoquer sa rupture (cassure) et calculer ensuite l'énergie de rupture du matériau. Ce pendule constitue aujourd'hui l'appareil de caractérisation de la résistance au choc (résilience) d'un matériau.

Au laboratoire de la SIDER ELHADJAR TSS, nous disposons d'un pendule de ce genre pour essais à la température ambiante.

Pour rapporter l'essentiel de notre travail, nous avons scindé ce mémoire en trois (05) chapitres.

Après une introduction générale sur le sujet, un premier chapitre présente l'étude bibliographique sur les matériaux et les principaux essais mécaniques utilisés pour la détermination des principales propriétés mécaniques des matériaux en nous focalisant un peu plus sur l'essai de traction et l'essai de Charpy.

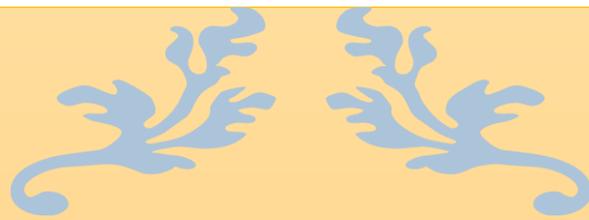
Le deuxième chapitre consiste essentiellement en la description de la partie technologique à travers lequel on présentera, les principaux processus de fabrication des tubes sans soudure et les différentes étapes de contrôle.

Un troisième chapitre portera essentiellement sur l'étude expérimentale, à travers laquelle on fera des essais de traction, essai de dureté, analyse chimique, essai de Charpy et la métallographie.

Ensuite, le quatrième chapitre portera sur les résultats et discussion de ses derniers.

Le dernier chapitre la simulation de la pression sur le logiciel Abaqus.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle seront soulignés les principaux résultats de cette étude.



Chapitre I

**Comportement des matériaux et
essais mécaniques**



I.1. Introduction :

Les matériaux métalliques constituent la base du développement technologique. Ceci est également valable pour la construction des outils, des machines, des installations et des automobiles que pour l'aéronautique et l'aérospatial et la médecine.

Les alliages à base de fer, aciers et fontes, constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Les aciers, en particulier, constituent une classe de ces matériaux très vaste possédant une large panoplie de caractéristiques mécaniques. Ils jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique.

Les aciers sont des matériaux de l'armement, de construction, de transport (trains, automobiles), de composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), d'outillage de frappe (marteaux, burins, etc.) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), etc. Ils sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine). L'acier a opéré sa révolution technologique pour être aujourd'hui présent dans presque tous les secteurs de l'activité économique (depuis les poutrelles et les armatures de béton armé, jusqu'aux aiguilles et aux prothèses de hanche), et se trouve au cœur de la vie quotidienne (boîtes, conserves...). Plusieurs facteurs expliquent cette importance: sur le plan mécanique, les aciers ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique, et à cause de leurs meilleures propriétés aussi physicochimiques que mécaniques qu'ils possèdent, ils se prêtent facilement à une production en masse. L'acier demeure le seul matériau capable tout à la fois de soutenir des efforts et des charges considérables, de conserver ses vertus à haute et basse température et de résister à la corrosion.

On peut modifier également leurs propriétés en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle des aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements mécaniques prenant en surface ou à cœur de la matière; on parle alors des aciers traités [1].

1.2 Caractérisation des propriétés mécaniques :

Pour pouvoir utiliser raisonnablement les matériaux il est essentiel de déterminer les conditions de déformation et de rupture des matériaux. Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques.

Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque.

De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (DIN, AFNOR, ISO, CEN).

La normalisation des essais porte sur :

- La géométrie de l'éprouvette (une éprouvette est une pièce de dimensions normalisées utilisée lors d'essais mécaniques visant à déterminer le comportement du matériau soumis à différents efforts mécaniques comme la traction, la torsion, la flexion...).
- la préparation de cette éprouvette.
- les machines d'essai et leur étalonnage.
- les techniques expérimentales mises en œuvre.
- le dépouillement et la présentation des données.

On peut distinguer :

1.2.1. Les essais peu liés au temps : (dans lesquels la déformation provoquée est peu liée à la durée d'application de la force) :

- ✓ **L'essai de traction**, de compression ou de flexion, détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau soumis à un effort progressif.
- ✓ **L'essai de dureté** fournit des renseignements sur la résistance à la pénétration d'une Pièce dure soumise à un effort constant.
- ✓ **L'essai de résilience** caractérise la résistance au choc.
- ✓

1.2.2. Les essais fortement liés au temps : (dans lesquels la déformation provoquée dépend de la durée d'application de la force) :

- ✓ **L'essai de fatigue** étudie le comportement du matériau vis à vis de sollicitations Alternées bien inférieures à la contrainte nécessaire pour le rompre.
- ✓ **L'essai de fluage** mesure la déformation, en fonction du temps, du matériau sous charge constante.

I.3. Lois de comportement des métaux :

Le comportement mécanique des matériaux est généralement formulé par des relations entre la contrainte, la déformation, la vitesse de déformation et la température qui sont des variables macroscopiques accessibles à la mesure. D'autres variables physiques liées à l'état de la microstructure, accessible ou non à la mesure telles que la densité moyenne des dislocations, la densité de dislocations mobiles, la taille des cellules de dislocations et la taille du grain peuvent

entrer en jeu dans ces formulations. Si le comportement élastique linéaire des matériaux homogène et isotrope se décrit de façon satisfaisante par la loi de Hooke, il n'en est pas de même pour le comportement inélastique.

Plusieurs approches ont été proposées durant les dernières décennies pour écrire des relations constitutives décrivant l'écoulement élastique ou viscoplastique des matériaux métalliques. Si le comportement élastique linéaire des matériaux homogène et isotrope se décrit de façon satisfaisante par la loi de Hooke, il n'en est pas de même pour le comportement inélastique.

I.3.1. Élasticité :

Un comportement élastique est caractérisé par le fait que, après décharge de la structure, il ne subsiste aucune déformation résiduelle, Le comportement est parfaitement réversible. L'état des déformations est indépendant du trajet de chargement et il existe un potentiel d'élasticité. Le tenseur des contraintes et celui des déformations sont reliés par une relation bijective. Le travail effectué pour passer d'un état d'équilibre à un autre peut être considéré comme le potentiel élastique.

Pour de très nombreux matériaux, il existe un domaine où le comportement élastique est linéaire, c'est-à-dire que les déformations sont proportionnelles aux contraintes. Un tel comportement est celui qui est le plus familier, le mieux connu et celui qui est le plus largement utilisé dans le calcul des structures, En élasticité, le temps n'intervient pas. Or, un comportement visqueux est caractérisé par l'intervention du temps.

Un matériau viscoélastique possède donc une loi de comportement qui est réversible, mais dans laquelle figure le temps. Après décharge, il ne subsiste pas de déformation résiduelle, mais sous charge constante la déformation évolue ; à déformation constante la contrainte varie ; plus généralement, celle-ci dépend de la vitesse de déformation, de son accélération, éventuellement de dérivées par rapport au temps d'ordre supérieur. Une relation linéaire entre la contrainte et la déformation et leurs dérivées successives par rapport au temps correspond à un comportement viscoélastique linéaire. Mais bien des matériaux ont un comportement qui n'obéit pas à une telle loi et sont viscoélastiques non linéaires. Il s'attache à la description des lois de comportement correspondantes et à la façon d'en déterminer les coefficients par des essais mécaniques. [2]

I.3.2. Élastoplasticité. Viscoplasticité :

Un matériau plastique, contrairement aux matériaux élastiques, conserve après décharge une déformation irréversible. Formellement, le comportement plastique est complètement indépendant du temps : il est indépendant de la vitesse de déformation ; cette dernière n'évolue pas lorsque le chargement est maintenu constant.

La déformation d'un matériau élastoplastiques comporte une composante élastique réversible et une composante plastique qui ne l'est pas. Typiquement, les métaux possèdent La déformation d'un matériau viscoplastique est non seulement irréversible, mais de plus elle est fonction du temps. Elle dépend de la vitesse de chargement ; elle évolue lorsque le chargement est maintenu constant. [2]

I.3.3. Détermination des propriétés élastoplastique :

I.3.3.1. Définition d'un comportement élastoplastique :

Un matériau élastoplastique est caractérisé par un seuil d'écoulement au-dessous duquel le comportement est purement élastique, alors qu'une fois celui-ci atteint la déformation n'est plus réversible. En toute rigueur, cette dernière est indépendante du temps, elle n'évolue pas si la charge est maintenue constante, elle ne disparaît pas progressivement après décharge. De même, le seuil n'est pas fonction de la vitesse de déformation. En pratique, il en est rarement ainsi et en réalité les matériaux ont le plus souvent un comportement Elasto-visco-plastique. Dans les matériaux cristallisés (métaux, céramiques, composés ioniques), la déformation plastique est le résultat du déplacement de défauts du cristal appelés dislocations.

À très basses températures, la contrainte appliquée est insuffisante pour réussir à faire franchir à ces dislocations les obstacles qui s'opposent à leur déplacement. Le comportement dépend alors de la vitesse de sollicitation. Il apparaît une composante de viscosité dans la loi de comportement.

À hautes températures (supérieures pour fixer les idées à la moitié de la température absolue de fusion), interviennent dans les processus de déformation d'autres défauts du cristal que sont-les Lacunes, sites atomiques vacants. Ces lacunes contribuent à la déformation en migrant sous l'action de l'agitation thermique. Le comportement visqueux devient prépondérant.

Il existe cependant un domaine appelé athermique où le comportement plastique est indépendant de la vitesse de sollicitation. C'est celui où la théorie de la plasticité s'applique sans approximation. Pour les vitesses de déformation usuelles, ce domaine athermique s'étend grosso modo de la température ambiante à la moitié de la température thermodynamique de fusion. À des

températures plus basses, il est encore possible de caractériser approximativement le matériau en termes de plasticité, quitte à tenir compte de l'effet de la vitesse de sollicitation sur la limite d'élasticité. [2]

I.3.3.2. Critères de plasticité :

La limite d'élasticité est la contrainte au-dessus de laquelle apparaissent les premières déformations plastiques irréversibles. En deçà de cette limite, toutes les déformations générées pendant le chargement de l'éprouvette peuvent être recouvrées.

La généralisation tridimensionnelle pour le cas d'un chargement complexe de cette définition du domaine élastique obtenu lors d'un essai uni axiale (traction ou compression) est appelée critère de plasticité. Elle permet de définir, dans l'espace des contraintes, la région pour laquelle le matériau aura un Comportement élastique.

Pour les métaux isotropes les deux critères isotropes les plus utilisés sont ceux de Von Mises et de Tresca.

L'expression de ces critères dépend à priori de toutes les composantes du tenseur des contraintes ainsi que de la limite élastique σ_s .

En raison de l'isotropie et donc de l'invariance par rapport aux repères, seuls les trois invariants du tenseur des contraintes peuvent entrer en compte. De plus, en raison de l'incompressibilité plastique par rapport à la contrainte hydrostatique, seuls les invariants $2 J$ et $3 J$ du déviateur des contraintes, σ' , peuvent intervenir.

Nous obtenons ainsi l'expression générale des critères isotropes

$$f(J_2, J_3, \sigma_s) = 0 \text{ avec } J_2 = \left(\frac{3}{2} \cdot \sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} ; J_3 = \left(\frac{9}{2} \cdot \sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{jk} \cdot \sigma'_{ki} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{I. 1}$$

a) Critère de Von Mises :

Le critère de Von Mises a été établi en considérant que le seuil de plasticité est lié à l'énergie élastique de cisaillement, ${}_d W$, qui est une fonction du produit tensoriel contracté sur deux indices du déviateur du tenseur des contraintes.

$$W_d = \frac{1}{4\mu} \sigma' : \sigma' = \frac{1}{4\mu} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = \frac{1}{6\mu} J_2(\sigma') \tag{I. 2}$$

Lorsque la limite d'élasticité s est atteinte au cours d'un essai de traction pur, l'état de contrainte est simple,

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Et l'énergie élastique de cisaillement se déduit :

$$\sigma' = \sigma - \frac{1}{3}tr(\sigma)I \quad W_d = \frac{1}{4\mu} \sigma' : \sigma' = \frac{1}{6\mu} \sigma_s^2 \tag{I. 3}$$

En égalant l'énergie élastique de cisaillement d'un état de contrainte quelconque avec celle d'une traction uniaxiale correspondant à l'obtention de la limite élastique, on aboutit à l'expression du critère de Von Mises :

$$f = \sigma_{eq} - \sigma_s = J_2(\sigma') - \sigma_s = 0 \tag{I. 4}$$

Ainsi, l'état de contrainte tel que $\sigma_{eq} = \sigma_s$ est équivalent au sens de Von Mises à l'état unidimensionnel défini par σ_s . Nous appellerons dorénavant contrainte de Von Mises la contrainte définie par $J_2(\sigma')$, qui est à comparer avec la limite d'élasticité en traction ou en compression.

L'expression développée de ce critère dans l'espace des contraintes est :

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)]} - \sigma_s = 0 \tag{I. 5}$$

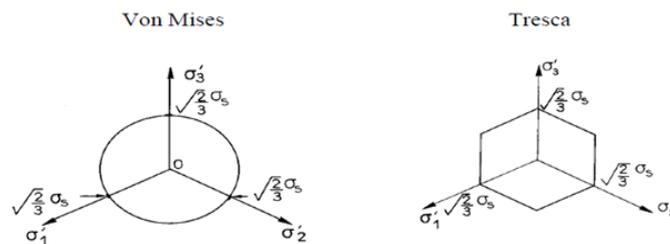


Figure I.1 Présentation des critères dans l'espace des contraintes déviatoriques

b) Critère de Tresca :

Le critère de Tresca relie le seuil de plasticité à la contrainte de Tresca, qui est la contrainte tangentielle maximale. En égalant la contrainte tangentielle maximale d'un état de contrainte quelconque avec celle d'une traction uniaxiale correspondant à l'obtention de la limite élastique, on aboutit à l'expression du critère de Tresca :

$$f = \frac{1}{2} \sup(|\sigma_i - \sigma_j|) - \frac{1}{2} \sigma_s = 0 \quad (\text{I. 6})$$

Les deux critères sont très proches et les deux permettent de bien décrire le comportement des métaux. En pratique leurs résultats sont relativement proches et l'écart n'excède pas 15%. [3] [4]

I.4. caractéristiques des aciers :

Un acier courant se caractérise essentiellement par sa composition et les caractéristiques mécaniques qui en découlent, bien que non rattachées à un type d'essai normalisé, les caractéristiques les plus souvent citées sont :

- a) **Élasticité** : c'est l'aptitude d'un matériau à se déformer sous une charge (un effort) et de retourner à son état initial après décharge.
- b) **Plasticité** : c'est la déformation d'un matériau sous une charge sans revenir à son état initial après décharge.
- c) **La rigidité** : c'est l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon élastique (et donc réversible). La rigidité est définie par le Module d'élasticité E. Plus le matériau est rigide, plus la force qu'on peut lui appliquer est importante.
- d) **Résistance maximale** : c'est la charge maximale que peut supporter un matériau. La charge peut être effort en traction ou couple en torsion.
- e) **Limite élastique** : c'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.
- f) **Ductilité** : c'est l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture. Un matériau qui se déforme plus avant rupture est plus ductile qu'un matériau qui se déforme moins.
- g) **Fragilité** : c'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau. Un matériau fragile se fracture sans se déformer plastiquement.
- h) **Ténacité** : c'est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie lors d'une déformation plastique. C'est une combinaison entre la bonne résistance à la rupture et la bonne ductilité. Une des façons de définir la ténacité est l'aire de la surface engendrée par la courbe de traction. La ténacité peut être mesurée par l'essai de *Résilience* Charpy. (Les termes résilience et ténacité ont des significations équivalentes).
- i) **La dureté** : l'aptitude du métal à résister à la pénétration et à l'abrasion. [5]

I.5. Intérêt et nécessité des essais mécaniques :

Il faut déterminer les propriétés mécaniques des matériaux pour dimensionner les structures de façon à éviter divers modes de ruines : le flambage, la déformation plastique exagérée, la rupture brutale ou la rupture différée par fatigue, corrosion sous contrainte ou fluage. Il est indispensable de maîtriser de mieux en mieux ces questions en raison tant des exigences accrues de sécurité, dans l'énergie nucléaire et dans les transports notamment, que des économies de matière et d'énergie susceptibles d'être apportées par une meilleure durabilité. Les calculs nécessitent une évaluation correcte des champs de contraintes et de déformations qui existent dans les pièces : il faut donc connaître les lois de comportement. De plus, il est indispensable de déterminer les limites qu'il ne faut pas dépasser pour éviter la ruine : limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.

En particulier, les progrès réalisés en mécanique de la rupture ont introduit toute une gamme nouvelle d'essais. Face à cette panoplie, l'ingénieur risque de se trouver embarrassé pour choisir celui qui apportera la réponse appropriée au problème posé. Or il est important de le faire non seulement pour aboutir à des réponses sans ambiguïté, mais aussi pour des raisons d'économies, certains essais élaborés coûtent cher. Il ne faut les employer que si les données qu'ils fournissent sont indispensables et il importe donc de savoir résister aux modes.

Dans bien des cas, les essais traditionnels éprouvés et économiques sont tout à fait suffisants. De ce point de vue, il est important de distinguer les essais qui fournissent des grandeurs utilisables dans les calculs de pièces ou de procédés, et qui permettent un dimensionnement précis, de ceux qui ont une valeur purement comparative mais qui permettent de suivre une fabrication et de contrôler la qualité d'un matériau ou de suivre l'influence d'un facteur métallurgique.

Les essais mécaniques font naturellement l'objet de nombreuses normes (AFNOR, ASTM, DIN, BS, ISO, etc.). [6]. Les pratiques qu'elles uniformisent s'appuient sur de nombreuses expérimentations. Il est indispensable dans toute la mesure du possible de s'y conformer ; c'est une garantie pour ne pas faire d'erreurs et cela permet la comparaison sans équivoque avec d'autres résultats, sans compter l'importance juridique que cela peut revêtir en cas de litiges. Mais les normes ne font que décrire des procédures sans expliquer les raisons de leur adoption. Les ingénieurs doivent connaître ces dernières et les comprendre aussi bien pour choisir convenablement les essais à effectuer que pour discuter les anomalies qui peuvent se rencontrer ou pour innover quand c'est nécessaire. Il faut insister sur le fait qu'ils ne sauraient donc suffire pour

entreprendre des essais mécaniques : la lecture et l'observation des normes est un complément indispensable. [6]

I.5.1. Essai de traction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module de d'élasticité, le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages. [7]

I.5.1.1. Les éprouvette :

L'essai de traction est exécuté sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette. Afin d'éviter toute influence de la force pinçant des mors, elles doivent être suffisamment loin des points d'amarrage. Les têtes ont une section supérieure à celle de la partie cylindrique de façon qu'elles ne subissent aucune déformation plastique et qu'elles ne cassent pas en premier. Comme la limite d'écoulement plastique dépend aussi des contraintes latérales, on doit essayer d'éviter toute influence de la force pinçant des mors. Ceci n'est pas un détail que l'on doit respecter seulement lorsqu'on effectue l'essai de traction. Dans la pratique aussi, on doit garder à l'esprit que la limite d'écoulement plastique déterminée dans un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uni axiale. L'éprouvette fixée par ses têtes, entre deux mordaches, est soumise à un effort de traction suivant son axe. Une longueur de base (L) est définie par la distance séparant les deux repères que constituent les points d'attache de l'extensomètre. Les repères sont à tracer très finement, afin qu'ils ne puissent pas constituer des amorces de rupture. En augmentant l'effort de façon continue, il y a d'abord l'allongement élastique uniforme et puis, au-delà de la limite d'écoulement plastique (= limite d'élasticité), l'allongement plastique qui s'y ajoute.

Au début, la déformation plastique est encore uniforme mais vers la fin lorsque la rupture s'approche, il y a apparition d'une striction (déformation non uniforme) et rupture. Les dimensions géométriques de l'éprouvette de traction sont montrées dans la figure I.1.

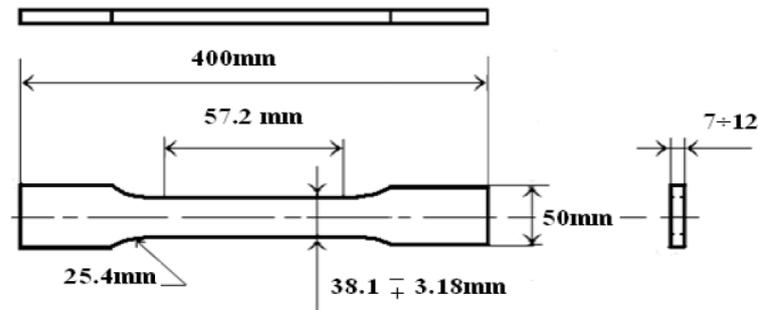


Figure I.1 Dimension d'éprouvette de traction.

I.5.1.2. Machines d'essais :

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système de démarrage. Grâce au micro-ordinateur, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches. La machine de traction doit être illustrée dans la figure I.2.



Figure I.2 la machine de traction.

I.5.1.3. Diagramme de traction :

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction présenté dans La figure I.3.

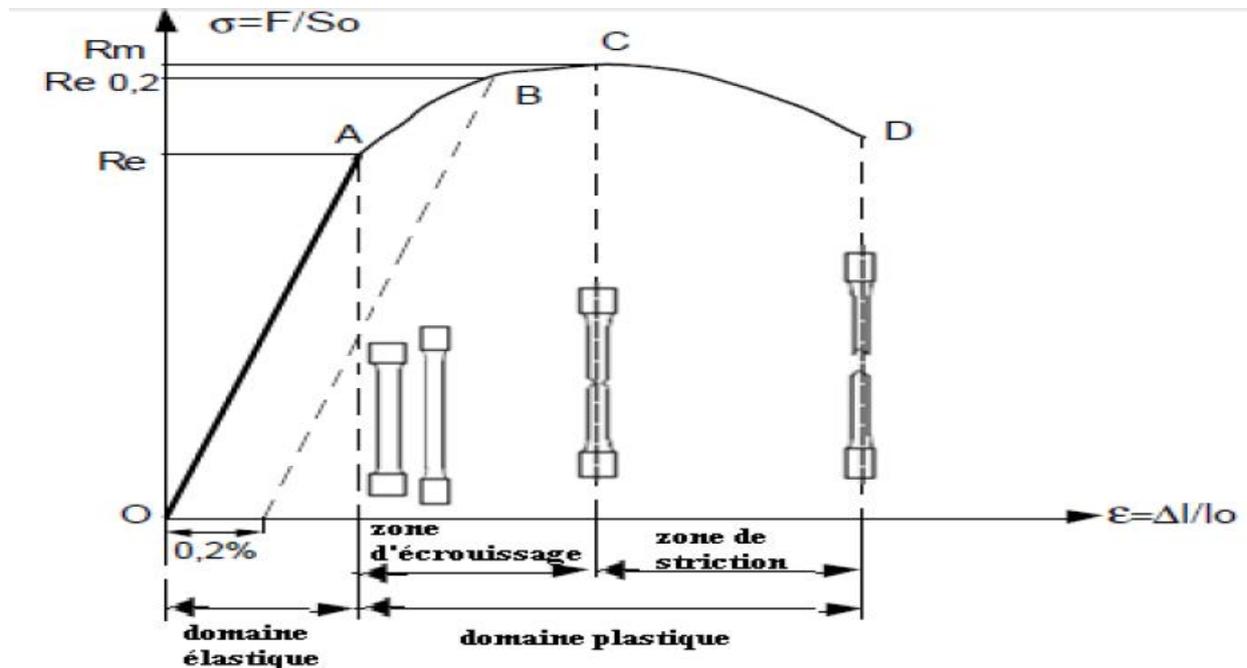


Figure I.3 diagramme de traction

On peut dire que ce graphe se divise en 3 domaines :

- OA : domaine élastique à déformation réversible, le point A marque la limite du domaine élastique ;
- AC : domaine de déformation permanent homogène ou de déformation plastique répartie ; le point C se situe à charge maximale et au début de la striction ;
- CD : domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; D point de rupture de l'éprouvette ;
- Phénomène d'écrouissage : la densité de dislocation et leur enchevêtrement deviennent de plus en plus élevés quand la déformation plastique croît, il faut appliquer une contrainte sans cesse croissante pour suivre la déformation plastique.

I.5.1.4. Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction :

a) Le module d'Young E (MPa) :

Il est défini comme la pente de la courbe de traction dans le domaine élastique (entre l'origine et R_e). Il est considéré comme invariable pour toutes les nuances d'acier et vaut en général : $E=210000\text{Mpa}$ souvent arrondi à 200000Mpa .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \Rightarrow \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{MPa})$$

b) La limite d'élasticité R_e (MPa) :

Elle marque la fin du domaine élastique. Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après "déchargement", il subsiste un allongement permanent soit un phénomène de rémanence).

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

c) La résistance ultime, ou contrainte maximum de traction R_m (MPa) :

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

d) L'allongement à rupture $A\%$ (%) :

L'allongement représente la déformation relative maximale admissible d'un acier avant rupture.

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

Dans cette expression, L_0 et L sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

e) Striction à la rupture :

La déformation par striction ne reste pas toujours homogène à partir d'un certain allongement, elle se localise dans une zone de l'éprouvette. C'est le phénomène de l'instabilité plastique la striction

$$Z\% = \frac{S_0-S}{S_0} * 100$$

Dans cette expression, S_0 et S sont respectivement les sections initiales et finales après rupture.

f) Coefficient de Poisson :

Tout matériau qui va s'allonger dans un sens va forcément rétrécir dans l'autre sens.

Cela est dû à la conservation de la matière. Une éprouvette qui s’allonge va donc voir son diamètre diminuer. En notant ϵ l’allongement longitudinal et ϵ_r l’allongement transversale, on peut exprimer le coefficient de Poisson:

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon}$$

I.5.2. Essais de résilience :

Cet essai permet de mesurer la résistance au choc d’un matériau en présence d’une entaille dite en U ou en V, selon sa géométrie.

On définit alors la **résilience** comme l’énergie absorbée par l’éprouvette pendant le choc KV ou KU , rapportée à la surface de la section à fond d’entaille S :

$$KCV = KV / S \quad \underline{ET} \quad KCU = KU / S$$

I.5.2. 1. Principe de l’essai Charpy :

Le **principe de base** consiste à mesurer l’énergie absorbée par la rupture lors du choc d’un barreau rectangulaire de dimensions $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$, présentant une entaille de 2 mm de profondeur en son milieu (cas de l’éprouvette avec entaille en V), et sollicité en flexion 3 points (figure I.4).

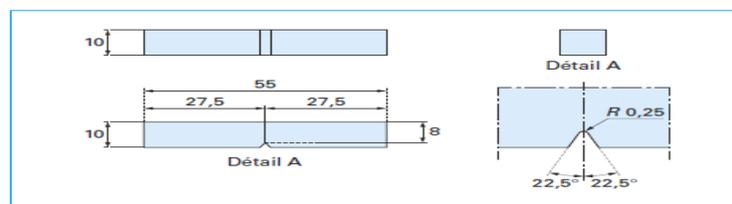


Figure I.4 Géométrie des éprouvettes Charpy entaillées en V

Le dispositif expérimental (figure I.5) est constitué d’un bras oscillant sur lequel est fixé le percuteur (ou marteau) qui vient frapper en son milieu l’éprouvette en butée sur deux appuis distants de 40 mm. Au moment du choc, la vitesse du marteau est d’environ 5 m/s (selon la géométrie du pendule). Sous le choc, l’éprouvette se déforme et se rompt entièrement, ou non, selon la résistance du matériau ; elle quitte les appuis, entraînée par le marteau qui continue sa course pendulaire. L’énergie absorbée par l’éprouvette pendant le choc, est donnée par l’écart entre la hauteur initiale h_i du marteau et la hauteur finale atteinte h_f :

$$KV = mg (h_i - h_f) \quad (1)$$

Avec :

m : masse du marteau,

g : accélération de la pesanteur.

Cette différence d'énergie potentielle est déterminée, dans la version la plus simple de l'appareillage, à l'aide d'un cadran permettant de mesurer l'angle de rotation du pendule.

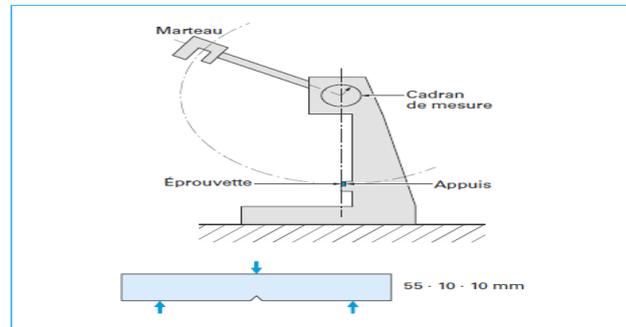


Figure I.5 Principe et géométrie de l'essai

I.5.2.2. Calcul et expression des résultats :

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ (W_0) et l'arrivée (W_1).

$$\text{On a donc: } W_0 = P \cdot h \quad (2.1)$$

$$W_1 = P \cdot h \quad (2.2)$$

$$W = P \cdot (h - h) \quad (2.3)$$

Pour connaître la résistance au choc Charpy (ou résilience), dans le cas d'une éprouvette non entaillée, on utilise l'équation :

$$K_{VN} = \frac{W}{h \cdot bu} \quad (2.4.a)$$

Avec:

K_{VN} : la résistance au choc Charpy (ou résilience) en J/cm².

W : l'énergie absorbée par l'éprouvette en Joules.

h : l'épaisseur de l'éprouvette en (cm).

bu : la largeur de l'éprouvette en (cm).

N.B : Pour une éprouvette entaillée, le terme bu est remplacé par b_N qui représente la largeur restante, en (cm), à la base de l'entaille de l'éprouvette. [8]

$$\text{D'où : } K_v = W / hb_N \quad (2.4.b)$$

I.5.3. Essais de dureté par pénétration :

I.5.3.1. Principe et relations générales :

C'est à cette catégorie d'essais qu'appartiennent la plupart des appareils employés industriellement. Un pénétrateur suffisamment dur pour ne pas être déformé par le matériau à essayer, et de forme variable (tableau 2), est enfoncé dans le métal par l'action d'une force constante appliquée dans des conditions bien définies ; on mesure soit les dimensions transversales, soit la profondeur de l'empreinte. Les tentatives faites pour opérer à dimensions d'empreinte constantes, et à charge variable, n'ont pas conduit à des méthodes utilisables industriellement. [10]

Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers	Knoop
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	Diamant	Diamant
Forme	Sphère	Cône	Sphère	Pyramide à base carrée	Pyramide à base losange
Dimensions	 D = 10 mm ; 5 mm ; 2,5 mm ; 1 mm	 θ = 120°	 D = 1/16" (1,587 mm) D = 1/8" (3,175 mm)	 θ = 136°	 α = 130° θ = 172° 30'

Au contact d'une bille sur un bloc plan, la répartition des contraintes et des déformations, si la limite d'élasticité n'est pas dépassée, est donnée par Hertz. Si la bille a un diamètre D et que la charge qui lui est appliquée vaut F , le diamètre d de l'aire de contact vaut :

$$d = 1,442 \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{1/3} (FD)^{1/3} \tag{1}$$

Avec ν_1, ν_2, E_1 et E_2 coefficients de Poisson et modules de Young de la bille (indice 1) et du bloc testé (indice 2).

La contrainte moyenne sur l'aire de contact vaut $\sigma_{\text{moy}} = - 4 F / \pi d^2$ et la contrainte maximale au centre de cette aire est telle que $\sigma_{\text{max}} = 1,5 \sigma_{\text{moy}}$. Ces contraintes sont donc proportionnelles à $(F/D^2)^{1/3}$. Le contact cesse d'être élastique quand σ_{max} atteint $1,613 R_p$ (R_p est la limite d'élasticité, cf. article Détermination des lois de comportement, dans cette rubrique Essais mécaniques des métaux). [10]

La théorie de la plasticité montre alors que $\sigma_{\text{moy}} \approx 3 R_p$ pour un matériau sans écrouissage.

À l'autre extrême, un matériau ayant un exposant d'écrouissage $n = 1$ se comporterait comme un matériau élastique et alors, en négligeant $1/E_1$ de la bille devant $1/E_2$ du bloc testé et en prenant $\nu_2 = 1/2$.

$$\sigma_{\text{moy}} = 5.652 \frac{d}{D} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \tag{2}$$

Plus généralement, on s'attend à ce que la contrainte équivalente sous le pénétrateur soit proportionnelle à σ_{moy} et que la déformation équivalente soit proportionnelle à d/D . si la loi de Consolidation (cf. article Détermination des lois de comportement [M 120]) est alors de la forme. [10]

I.5.3.2. Essai de dureté Brinell :

Dans l'essai proposé par Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène. Son diamètre D vaut normalement 10 mm, mais aussi 5 mm, 2,5 mm et 1 mm. Elle est appliquée sur le métal avec une charge F (normalement 3 000 kgf).

Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d , d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal, donc que celui-ci est moins dur (figure 6).

Cette mesure peut se faire à 0,05 mm près à l'aide d'une réglette spéciale dite réglette Le Châtelier, soit, beaucoup plus souvent, avec une lunette à oculaire micrométrique d'un grossissement de l'ordre de 20.

La dureté s'exprime par le rapport de la charge F à la surface S de la calotte sphérique imprimée dans le métal :

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2 \times 0,102 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec :

F : (N) charge,

D : (mm) diamètre de la bille,

d : (mm) diamètre de l'empreinte.

D'après la formule (9), il faut maintenir le rapport F/D^2 constant.

À l'origine, la norme avait prévu que F , exprimée en kilogrammes force, serait égale à $30 D^2$, soit pour une bille de 10 mm de diamètre (c'est-à-dire la bille normale) $F = 3 000$ kgf et pour une bille de 5 mm, 750 kgf. La modification du système d'unités a perturbé le rapport simple et maintenant, au lieu de 3 000 kgf, la force F est de :

$$\frac{3 000}{0,102} \approx 29 400 \text{ N}$$

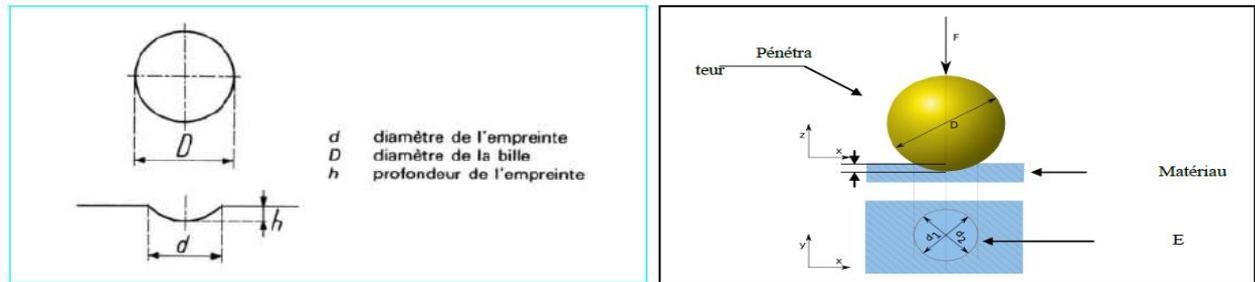


Figure I.6 Principe de dureté brinell.

I.5.3.3. Essai de dureté Rockwell :

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère *HRC* (fig. I.24a), ou bien sphérique pour le critère *HRB* (fig. I.24b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de $0,2\text{mm}$. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre $1,588\text{ mm}$ ou $3,175\text{mm}$ [11].

L'essai se déroule en trois phases.

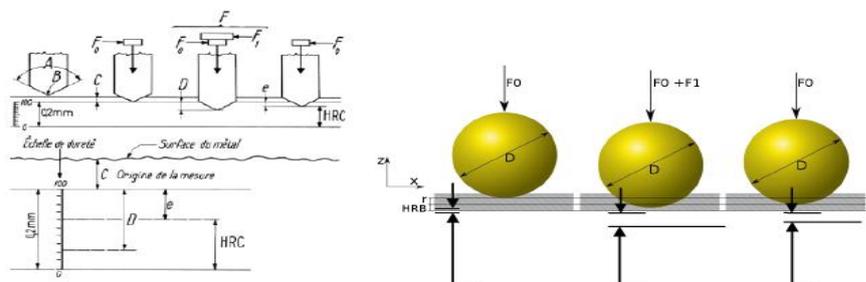


Figure I.7. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle *HRC*, b) échelle *HRB*.

Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.

1. Une phase *P* de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P .
2. Une phase *R* de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement. [11].

I.5.3.4. L'essai de dureté Vickers :

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur (fig. I.25).

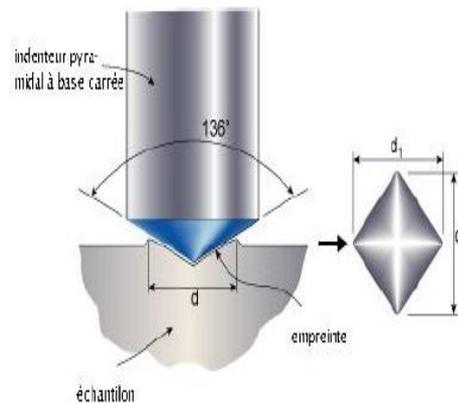


Figure I.8 Principe de dureté Vickers

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons.

Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur.

D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester [11].

La force F étant exprimée en kgf , le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm^2 selon la relation suivante

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2} \quad (I.7).$$

avec:
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

L'essai de Vickers celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique.

I.5.4. Intérêt et application des essais d'indentation :

Le tableau II.1 regroupe les principales directives pour une bonne réalisation d'un essai de dureté par indentation, [12].

Tableau I.1. Comparaison entre les méthodes par pénétration

<i>Type d'essai</i>	<i>Pénétration de la pièce</i>	<i>Utilisation principale</i>	<i>commentaire</i>
<i>Brinell</i>	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (<i>tournage ou meulage</i>).	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes
<i>Rockwell</i>	Bonne préparation de surface (<i>au papier de verre OO par exemple</i>). la présence de rayures donne des valeurs sous estimée.	En atelier	L'essai est simple et rapide Convient pour des duretés plus élevées (<i>supérieures à 400 Brinell</i>). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces (<i>il est nécessaire que la pièce soit parfaitement stable</i>). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.
<i>Vickers</i>	Etat de surface très soignée (on obtient de petites empreintes, les présences d'irrégularité gêne le lecteur)	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces des petites dimensions. La lecture de longueur de diagonale est généralement lente.

Les différentes essais par pénétrateurs ont permis d'établir des relations empirique [13,14] à partir de corrélation entre la dureté *Vickers HV*, la dureté *Brinell HB* et la résistance de la rupture R_m pour différents aciers (relations I.8 et I.9):

$$R_m = 77,14 + 2,6396 HV + 0,0010 HV^2 \quad (I.8)$$

$$R_m = 164,71 + 2,222 HB + 0,002 HV^2 \quad (I.9)$$

A partir de ces deux relations, il est possible de relier directement les duretés *Vickers* et *Brinell*. Différentes autres relations sont proposées dans la bibliographie pour relier les duretés et les

caractéristiques mécaniques des matériaux [15] mais ces relations sont empiriques et doivent être utilisées avec prudence.

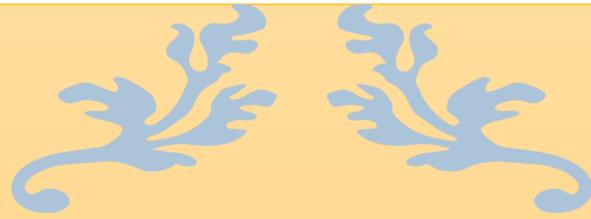
I.6. Conclusion

De ce point de vue, il est important de distinguer les essais qui fournissent des grandeurs utilisables dans les calculs de pièces ou de procédés, et qui permettent un dimensionnement précis, de ceux qui ont une valeur purement comparative mais qui permettent de suivre une fabrication et de contrôler la qualité d'un matériau.

Dans la première catégorie, on trouvera par exemple les essais de traction, de mesure de la ténacité K , de fatigue, de mesure de la vitesse de fissuration.

Dans la seconde, les essais de dureté, de résilience, etc.

Ces derniers essais ont le mérite de la simplicité ; diverses corrélations permettant de déduire de leurs résultats des constantes intrinsèques ont été proposées et elles peuvent rendre de grands services dans bien des cas.



Chapitre II

Essais expérimentaux



II. 1. Introduction :

La connaissance des propriétés d'un tube de transport des hydrocarbures nécessite de connaître la composition chimique du métal de base et faire des essais mécaniques tels que la traction, la dureté et la résilience.

Nous allons présenter dans ce chapitre les méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation de l'acier X52 Q.

II.2. Essais utilisés pour la caractérisation :

Les méthodes expérimentales sont axées sur une caractérisation du comportement mécanique de l'acier API 5L X52 Q utilisé dans le transport du pétrole et gaz.

Nous avons commencé par une analyse chimique, suivie des essais de traction, de résilience et de dureté avec une description des éprouvettes et des dispositifs expérimentaux ayant permis de mener des essais.

II.2.1 Analyse chimique :

Une analyse spectrale a été effectuée par un spectromètre (Microscope optique OLYMPUS COLOR VIEW BX 51M avec grossissement de 75 X au 2250 X) (Figure II.1) dans le laboratoire central appartenant à la structure contrôle qualité SIDER EL HADJAR.

Ce travail a pour but :

- Déterminer la composition chimique de l'acier
- Le pourcentage de chaque élément
- Avoir une idée globale sur les caractéristiques de l'acier



Figure II.1 Spectromètre Thermo Fisher

II.2.1.1 Préparation des échantillons:

Pour pouvoir réaliser une analyse chimique d'un matériau, il serait indispensable de préparer l'échantillon adéquat du point vu taille et dimension (35mm x 35mm) ; pour cela nous avons prélevé deux échantillons (1) & (2) de chaque coulée (AC & AB).

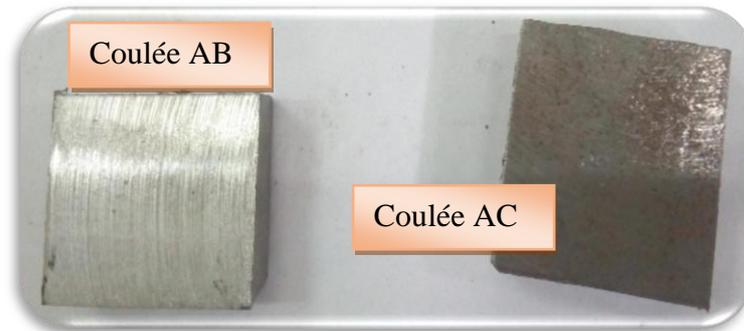


Figure II.2 Echantillons pour analyse chimique



Figure II.3 Echantillons après bombardement

II.2.2 Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort croissant et régulier de traction. Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes extraites des tubes, pour trouver les propriétés mécaniques de notre matériau.

II.2.2.1 Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont prélevées dans le sens longitudinal de tube d'après la norme API, (Figure II.4) et usiné au laboratoire d'essai mécanique de l'entreprise SIDER ELHADJAR TSS sur une fraiseuse pour avoir la forme finale, (Figure II.5) et (Figure II.6).

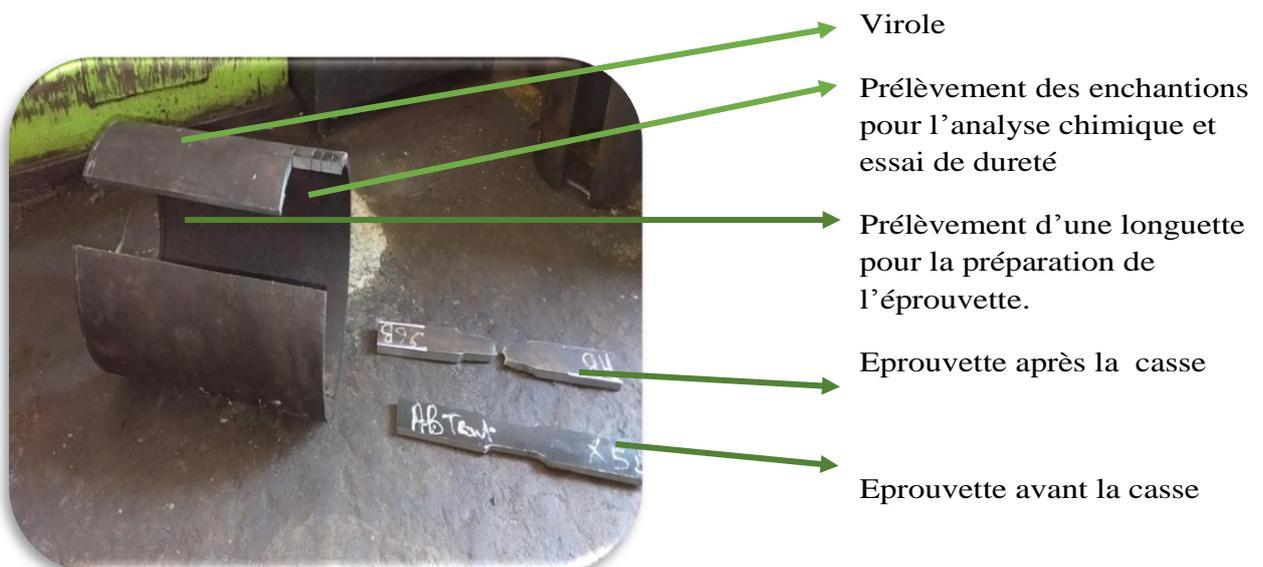


Figure II.4 Méthode de prélèvement des éprouvettes et échantillons.

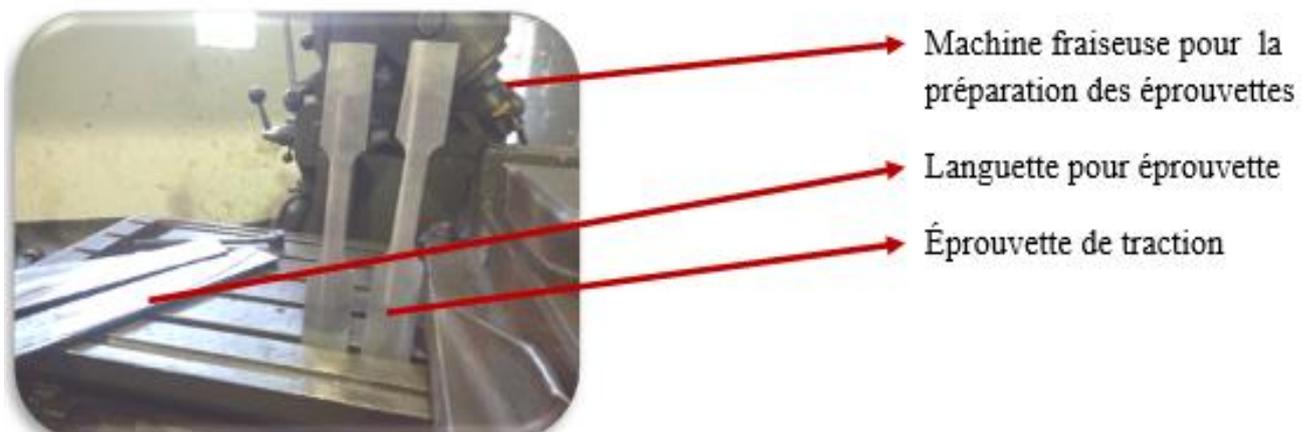


Figure II.5 Préparation des éprouvettes.



Figure II.6 Éprouvette Avant essai (acier API-X52 Selon la Norme API 5L).

II.2.2.2 Machine d'essai de traction :

Nous avons effectué l'essai de traction au laboratoire des essais mécanique de métallurgie de l'entreprise nationale algérienne SIDER dans le service « TSS », sur une machine universelle de type *Z1200 ZWICK/ROELL* de capacité 120 To.

La forme de l'éprouvette est définie par la norme ASTM A370.

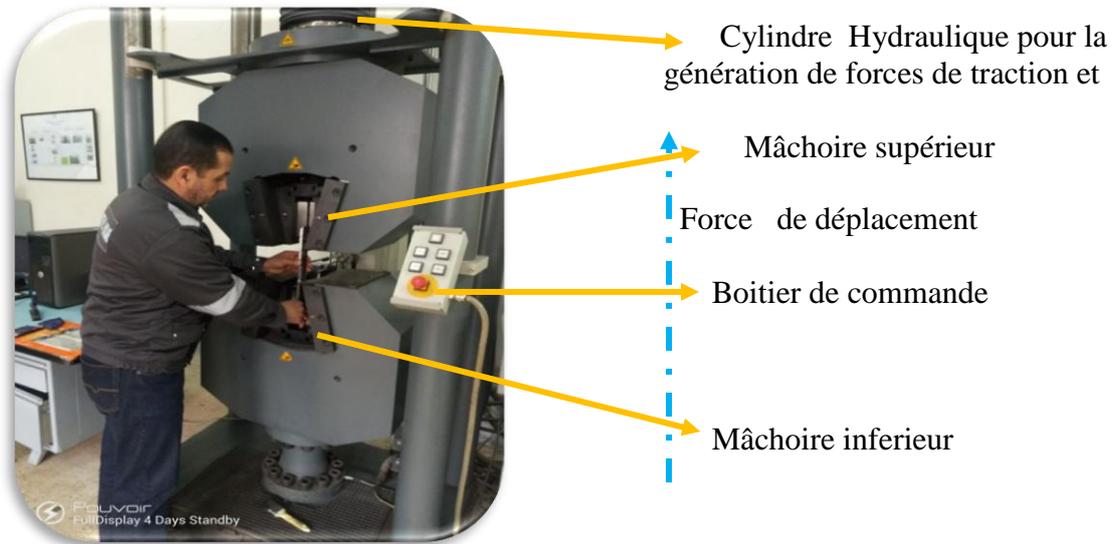


Figure II.7 Machine de traction *Z1200 ZWICK/ROELL 120To*

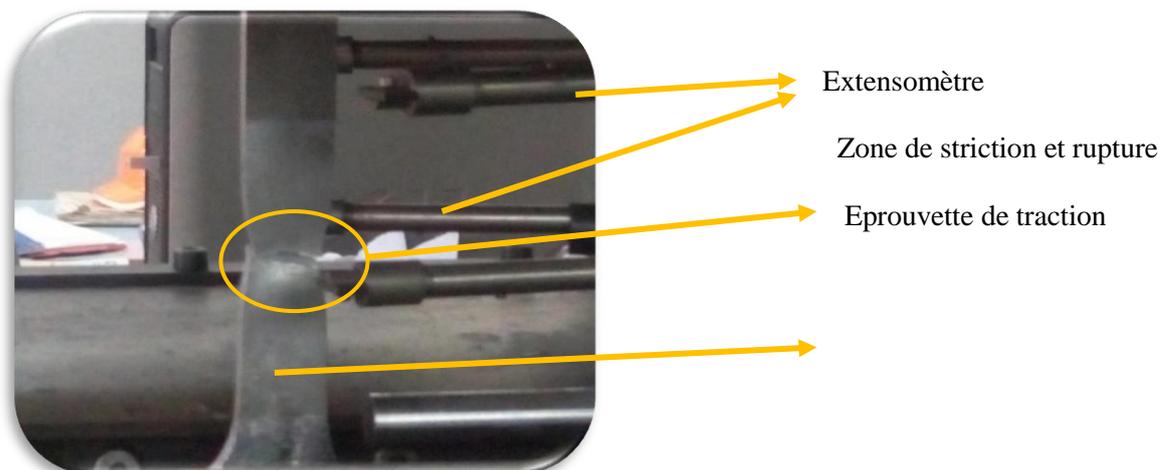


Figure II.8 Fin de traction

II.2.2.3 Conditions de réalisation de l'essai :

- L'essai est réalisé à une température ambiante contrôlée.
- Une fois l'éprouvette en place, on applique une légère précharge afin d'être sûr que l'on n'a pas de jeu, après la remise à zéro de la machine, puis on effectue un déplacement de

la travée à une vitesse constante qui a pour effet d'étirer l'éprouvette, et on mesure l'effort généré par ce déplacement, le mouvement est fait par un piston hydraulique.

- L'essai ne s'arrête qu'à la rupture de l'éprouvette.
- La vitesse est un paramètre d'essai très important, les grandeurs classiquement recherchées : (R_e , R_m , $A\%$, E ,...) nécessitent une vitesse lente pour limiter l'effet de l'échauffement local et assurer une cinétique de chargement de structure.



Figure II.9 Epreuve de traction de l'acier API-X52Q après essai.

II. 2. 3 Essais de résilience :

Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisantes car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile. L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction et une exigence normative. L'essai de flexion par choc, nommé aussi de résilience, sur éprouvette entaillée Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale.

II. 2. 3. 1 Préparation et dimensionnement de l'éprouvette :

Les éprouvettes de résilience sont prélevées d'une virole d'un tube dans le sens transversal, La Figure II.10 montre la position de l'éprouvette.

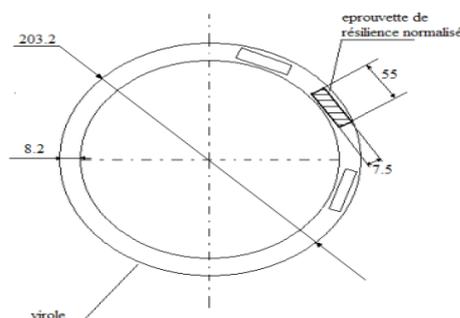


Figure II.10 position de l'éprouvette de résilience.

Les coupes sont faites par une scie mécanique munie d'un système de refroidissement évitant ainsi les phénomènes d'écaillage et l'échauffement des pièces (Figure II.11).



Figure II.11 Coupe des éprouvettes sur scie mécanique

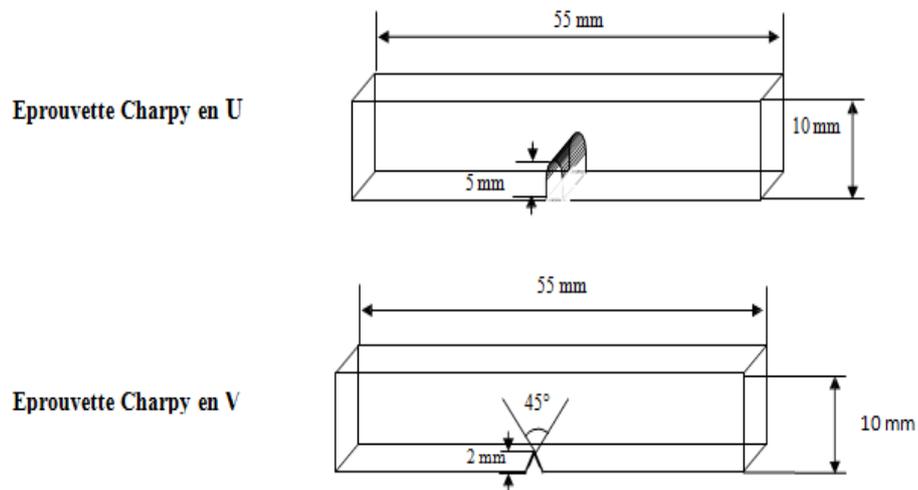


Figure II.12 géométrie des éprouvettes



Figure II.13. Préparation des entailles

II.2.3.2 Machine d'essai résilience :

Ces essais ont été effectués sur un mouton Charpy V, au laboratoire de métallurgie de SIDEREL HADJAR / TSS.



Figure II.14 Mouton Charpy V

II. 2. 3. 2 Conditions de réalisation de l'essai :

- L'essai est réalisé à une température définie.
- L'éprouvette doit être disposée sur les appuis du mouton de Charpy, de manière à ce que l'arrêt du couteau du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la surface opposée à celle-ci.
- Pour l'essai normal, l'énergie nominale du mouton doit être de 300 joules.
- Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas complètement, la valeur obtenue pour la résilience est incertaine, dans ce cas il faudra mentionner: «Eprouvette non rompue par X joules», et on relèvera l'angle de rupture de la pièce.

II. 2. 3. 4 Déroulement de l'essai de choc Charpy traditionnel :

Nous avons réalisé 18 essais Charpy.

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figure II.15).

Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau (selon la norme), l'essai est fait avec trois températures différentes (22°C, 0°C et -30°C).

- Les précautions suivantes ont été prises:
- Bien positionner l'échantillon sur ces deux points d'appui.
 - L'échantillon ne doit pas comporter d'amorce de rupture.
 - Vérifier la normalisation de l'échantillon.



Figure II.15 Déroulement de l'essai de résilience

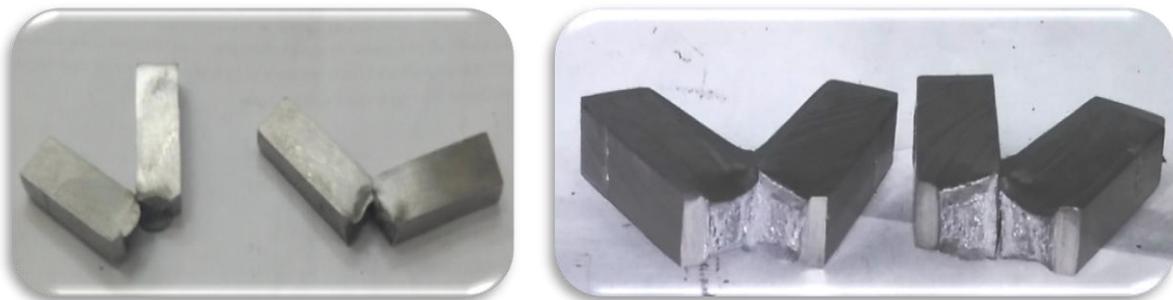


Figure II.16 échantillons après essai

II. 2. 4 Essais de dureté Vickers

C'est un moyen de contrôle non destructif très utilisé en contrôle final. Il est possible d'obtenir, à partir du chiffre de dureté, une bonne approximation de la résistance à la traction. Ceci est surtout utile dès que l'échantillon du matériau en question est petit pour en faire une éprouvette de traction.

L'essai de dureté, Vickers, a été effectué conformément à la norme internationale ISO 6507, à l'aide d'un Duromètre de type : SAUTER HO (**Ultrasonic Hardness Testing device Version 1.0 07/2015 HO-A02**), pour les deux échantillons 1 et 2, et ce après avoir subis un polissage sur la surface d'essai.

II. 2.4. 1 Préparation et dimensionnement de l'échantillon:

La surface doit être plane et nettoyée (sans lubrifiant, sans oxyde ou calamine). Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante afin que le pénétrateur ne déforme pas le matériau. Dans le cas contraire, la mesure ne serait pas fiable. Il faut une épaisseur d'au moins huit fois la profondeur h de l'empreinte.

Pour les essais de dureté, une plaque rectangulaire (35 x 35 mm) a été extraite dans l'état final dans le sens de laminage (L).



Figure II.17 échantillon de dureté

II. 2.4. 2 Appareil d'essai de dureté :

Ce duromètre à ultrasons est parfaitement conçu pour les contrôles de dureté mobiles où on attache de l'importance aux résultats rapides et précis.

- **Principe** : Le SAUTER HO mesure à l'aide d'un barreau vibrant, qui vibre avec la fréquence à ultrasons et qui est appuyé sur l'échantillon avec une force définie. À l'extrémité inférieure se trouve un pénétrateur Vickers. Sa fréquence de résonance augmente dès qu'elle entre en contact avec l'échantillon lors de la réalisation de l'empreinte. Le décalage de fréquence de résonance ainsi généré est affecté à la dureté Vickers correspondante par un appareil d'ajustage ad hoc.



Figure II.18 Appareil d'essai de dureté

II. 2.4. 3 Conditions de réalisation de l'essai :

- L'essai est effectué à température constante.
- La charge est appliquée progressivement sans chocs, ni vibrations et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On préparera la surface pour éviter toute altération.
- La pièce doit reposer sur un support rigide.

Si le barreau vibrant n'est pas en position verticale avec l'échantillon les résultats seront erroné.



Figure II.19 Mesure incorrecte (résultat erroné) **Figure II.20** Mesure correcte (résultat juste)

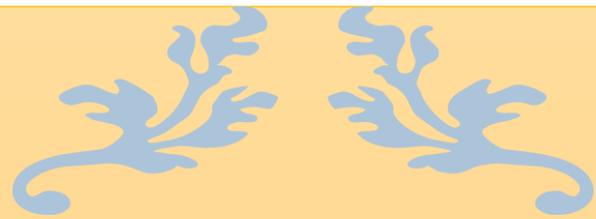
II. 3 Conclusion :

Le chapitre III présente les différents essais expérimentaux pour la détermination des propriétés de l'acier X52 selon les normes.

Il explique les modes de prélèvement et préparation des éprouvettes de traction et de résilience ainsi que les échantillons de la dureté et l'analyse chimique, puis les protocoles des essais mécaniques.

Notre objectif est de préciser les modes de prélèvement des éprouvettes et échantillons afin de réussir les essais et avoir des résultats pertinentes.

Le prochain chapitre analysera les résultats des essais réalisés pour la caractérisation de l'acier X52 et discutera les différents comportements.



Chapitre III

Résultats et discussions



III.1. Présentation du matériau :

Le matériau objet de cette étude est un acier au Carbone-Manganèse L360 (X52) utilisé pour la fabrication de tubes à usage dans le transport des hydrocarbures dont la pression de service est de 40 à 70 bar, et est éprouvé chez le fabricant jusqu'à 220 bars. Ce produit stratégique (tube) est gouverné par la norme américaine API (American Petroleum Institute) API 5L pour les tubes de transport des hydrocarbures et API 5CT pour les tubes utilisés pour le forage (Casing) ; cette norme définit toutes les exigences pour la fabrication (Grade, Dimension, Méthode de contrôle ...)

L'élaboration de cet acier X52 est réalisée conformément à l'API chez SIDER EL Hadjar sous forme de lingot utilisé par l'unité TSS pour la fabrication de tubes.

Les échantillons du matériau objet de cette étude sont pris à partir de tubes de diamètre 10''3/4 (273.1mm), épaisseur 11.1mm fabriqués à partir de deux coulées, qui sont fabriqués par le laminage à chaud, **Figure III.1**

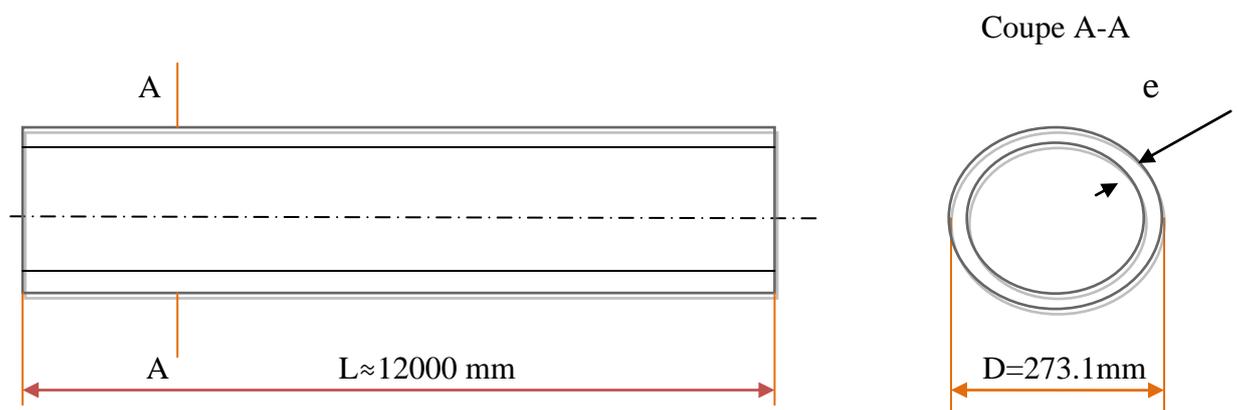


Figure III.1 Géométrie de tube.

Les tableaux suivants montrent les propriétés mécaniques et la composition chimique comme définies par la norme API 5L pour l'acier L360 (X52) :

Tableau III.1 Exigences Propriétés mécaniques de l'acier X52Q

Nuance	σ_e	σ_r	A %
X 52 Q	360 MPa Min 530 MPa Max	455 MPa Min 758 MPa Max	26% Min

Tableau III.2 Exigences composition chimique pour Grade X52Q

Table 5—Chemical Composition for PSL 2 Pipe with $r \leq 25.0$ mm (0.984 in.)

Steel Grade (Steel Name)	Mass Fraction, Based on Heat and Product Analyses % max									Carbon Equivalent ^a % max	
	C ^b	Si	Mn ^b	P	S	V	Nb	Ti	Other	CE _{IW}	CE _{PCM}
Seamless and Welded Pipe											
L360N or X52N	0.24	0.45	1.40	0.025	0.015	0.10	0.05	0.04	d,e,j	0.43	0.25
L390N or X56N	0.24	0.45	1.40	0.025	0.015	0.10 ^f	0.05	0.04	d,e,j	0.43	0.25
L415N or X60N	0.24 ^f	0.45 ^f	1.40 ^f	0.025	0.015	0.10 ^f	0.05 ^f	0.04 ^f	g,h,j	As agreed	
L245Q or BQ	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04	e,j	0.43	0.25
L290Q or X42Q	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04	e,j	0.43	0.25
L320Q or X46Q	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04	e,j	0.43	0.25
L360Q or X52Q	0.18	0.45	1.50	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04	e,j	0.43	0.25
L390Q or X56Q	0.18	0.45	1.50	0.025	0.015	0.07	0.05	0.04	d,e,j	0.43	0.25

III.2 Analyse chimique :

Le tableau IV.3 représente la composition chimique de l’acier utilisé, telle qu’elle ressort des analyses sur coulée.

Tableau III.3 Résultat composition chimique de l’acier API 5L Grade X 52 Q

Camp	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Al	Cu	Sn	Ni	Ti
Coulée AB	0.15	1.32	0.25	0.005	0.01	0.016	0.007	0.01	0.007	0.022	0.032	0.003	0.013	0.01
Coulée AC	0.16	1.34	0.26	0.006	0.01	0.015	0.008	0.01	0.008	0.023	0.034	0.003	0.014	0.02

- On remarque clairement que notre matériau est totalement conforme par rapport à la norme API SPEC 5L Grade X52 Q.

III.3 Essai de traction

Chaque essai est réalisé sur une éprouvette « plate » en acier de section rectangulaire (400 mm x 50mm)



Figure III.2 Éprouvette de traction de l'acier API-X52 après essai.

III.3.1 Courbes Contrainte-Allongement TSS et résultat :

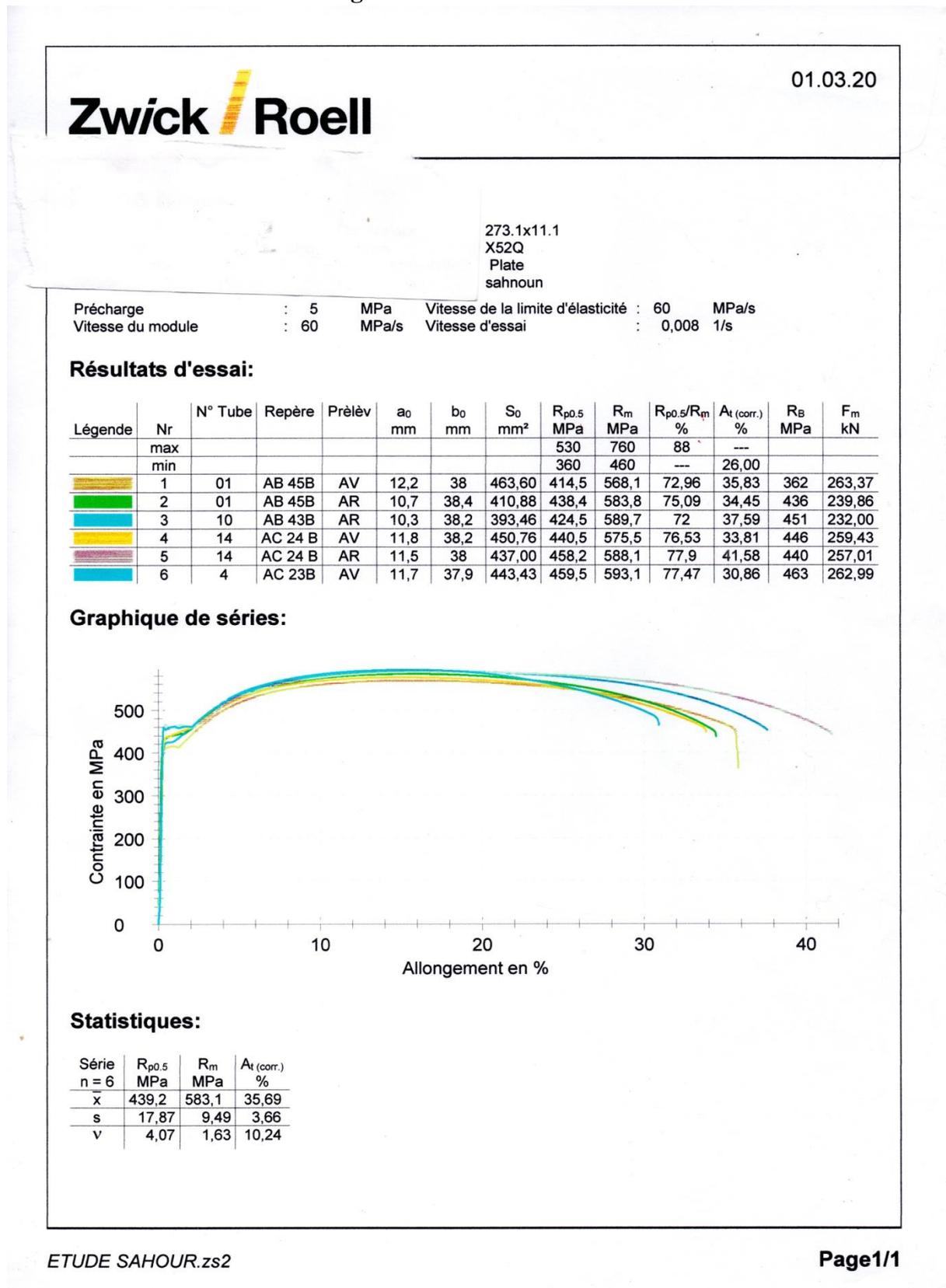


Figure III.3 Courbes Contrainte-Allongement des 6 Échantillons prélevés des tubes

Tableau III.4 résultats d'essai de traction

	N° Tube	Repère	R _B	a ₀	b ₀	R _{p0.5}	S ₀	R _m	R _{p0.5} /R _m	A _{t. (corr.)}	F _m
			MPa	mm	mm	MPa	mm ²	MPa	%	%	kN
Éprouvette 1	01	AB 45B	361,915	12,2	38	414,484	463,6	568,104	72,9592	35,8266	263,373
Éprouvette 2	01	AB 45B	436,392	10,7	38,4	438,375	410,88	583,783	75,0921	34,4492	239,864
Éprouvette 3	10	AB 43B	450,545	10,3	38,2	424,541	393,46	589,650	71,9988	37,5895	232,003
Éprouvette 4	14	AC 24B	446,294	11,8	38,2	440,450	450,76	575,546	76,527	33,8076	259,433
Éprouvette 5	14	AC 24B	440,301	11,5	38	458,151	437	588,126	77,9000	41,5840	257,011
Éprouvette 6	4	AC 23B	463,337	11,7	37,9	459,452	443,43	593,089	77,4676	30,8574	262,993

III.3.2 Analyse des résultats des essais de traction :

- Les valeurs des propriétés mécaniques obtenues suite aux essais de traction sont données dans le tableau III.4.
- Les essais ont été menés à une vitesse de la limite d'élasticité à 60 Mpa/s et une vitesse d'essai de 0.008 1/s.
- L'évolution de R_{p0.5} et R_m en fonction de l'allongement est représentée par la Figure III.10 et Figure III.11, par rapport à la norme API 5L, les valeurs sont dans l'intervalle de la norme, et généralement il n'y'a pas de grandes différence entre les valeurs trouvées.
- Les courbes pratiquement sont les mêmes est suivent la mêmes tendance.
- Une partie linéaire exprime l'élasticité du matériau qui donne la limite d'élasticité σ_e, et une partie non linéaire qui montre la déformation du matériau jusqu'à la rupture.
- En va voir les détaille de chaque courbes.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 1

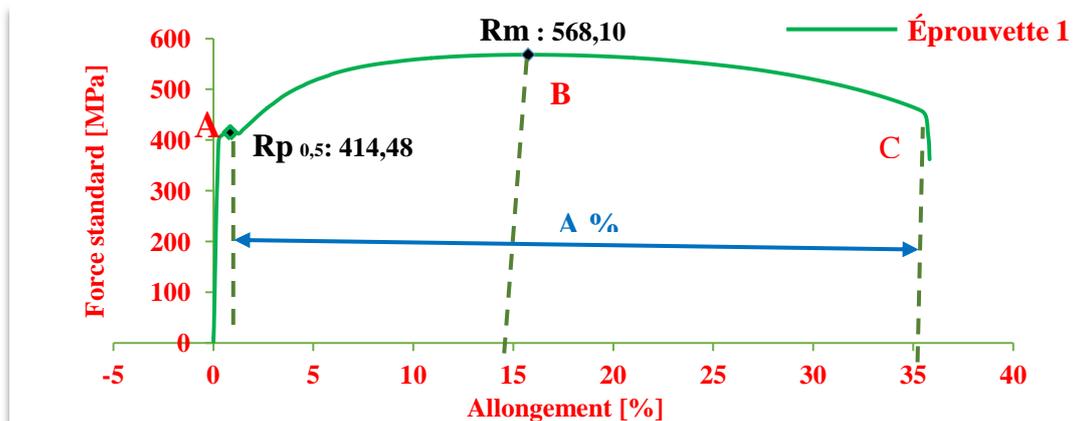


Figure III.4 Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 01

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 2

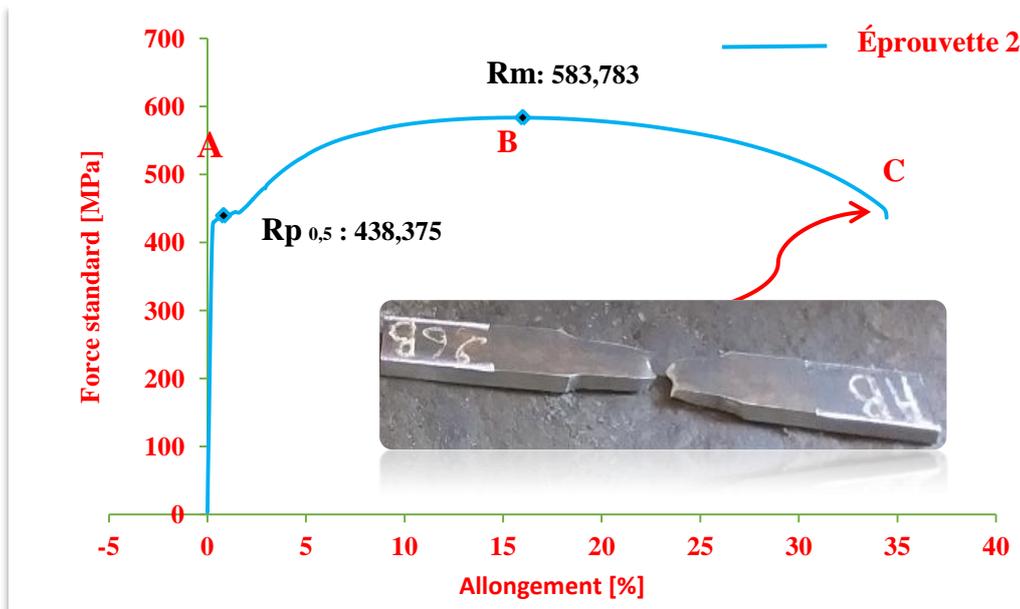


Figure III.5 Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 02

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 3

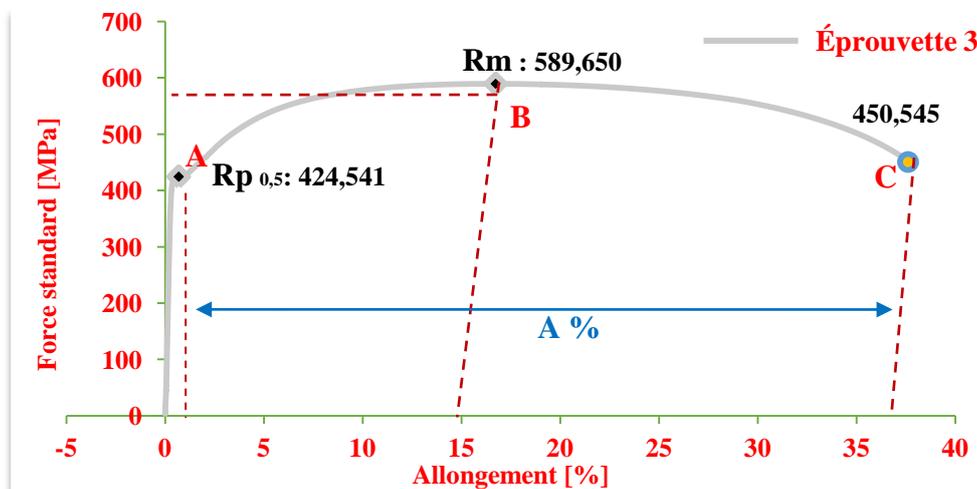


Figure III.6 Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 03

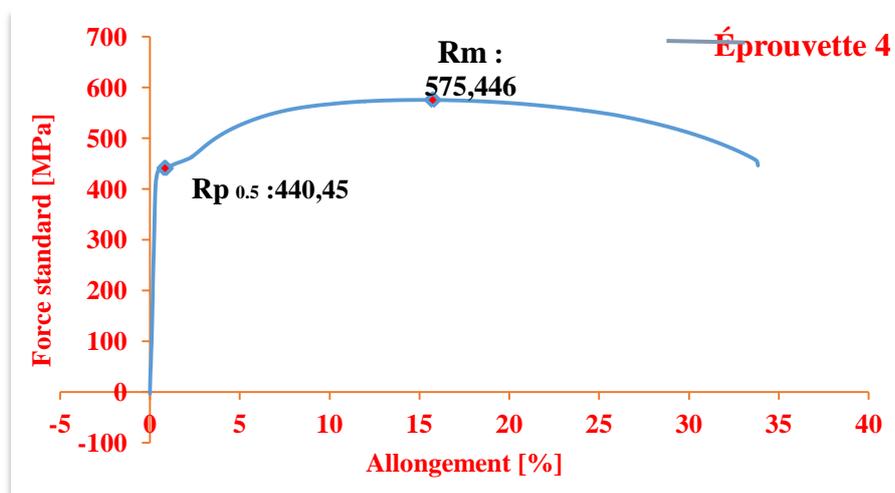
- La Figure III.6 représente la courbe conventionnelle Force-Déplacement dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS.
- La courbe confirme le comportement élastoplastique du matériau.
- Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

Différentes zones de la courbe obtenue :

- à A : Zone de déformation élastique (réversible)
- A à E : Palier de plasticité (présence d'un acier doux ou métal non ferreux pur)
- E à B : Zone de déformation plastique répartie
- B à C : Zone de déformation plastique non répartie. Il y'a formation et la striction de l'éprouvette puis rupture,

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 4

**Figure III.7** Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 04

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 5

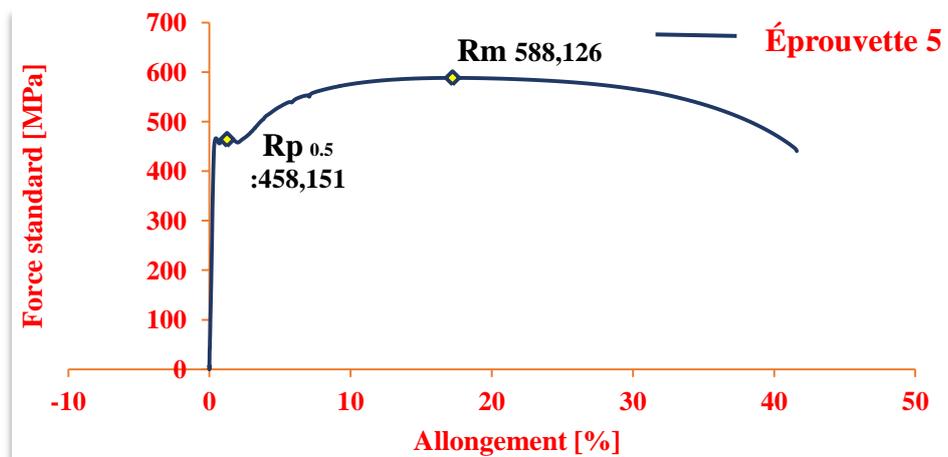


Figure III.8 Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 05

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

❖ Résultat de l'éprouvette N° 6

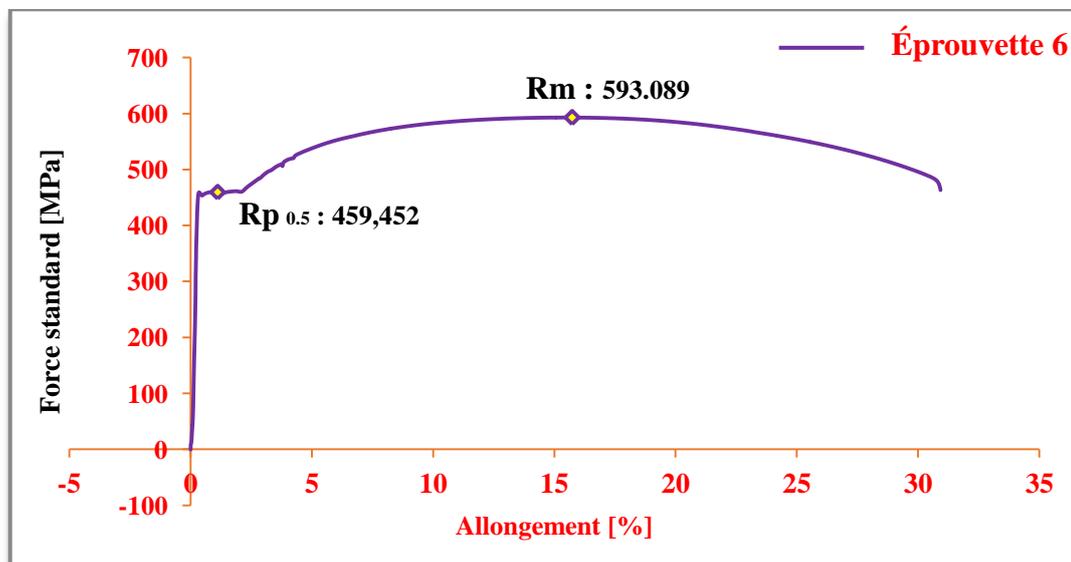


Figure III.9 Courbe conventionnelle donnée par la TSS éprouvette 06

Les valeurs principales des caractéristiques mécaniques du matériau, obtenues par les essais de traction, sont sur le graphe.

III.3.3 Comparaison entre la courbe TSS et la courbe vraie calculée :

- Courbe conventionnelle Force-Déplacement et courbe vraie contrainte déformation dont les valeurs de l'essai sont fournies par la TSS.

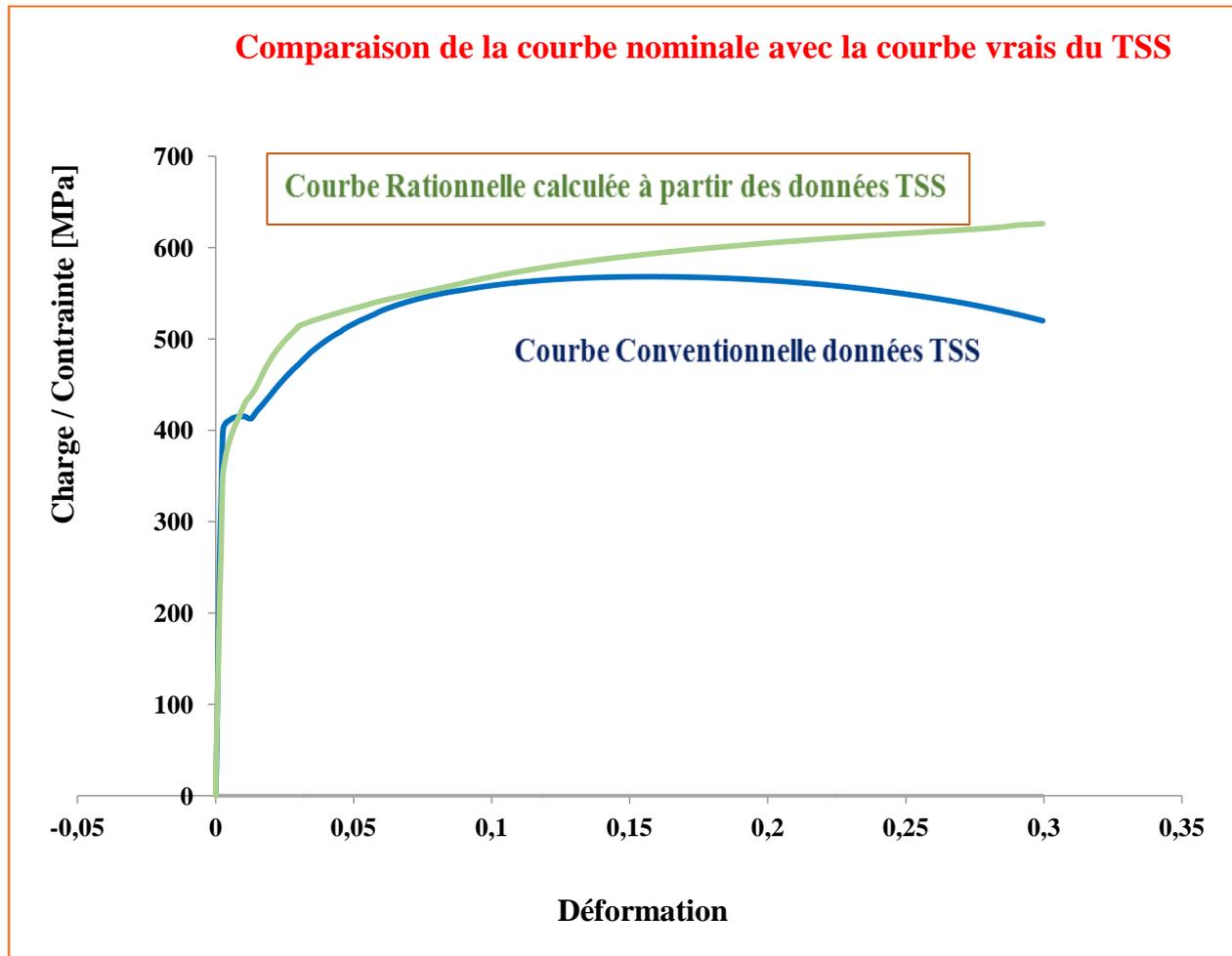


Figure III.10 Comparaison entre courbe conventionnelle et rationnelle

Dans un premier temps, la déformation est élastique. La courbe de traction est donc une droite, la pente de cette droite donne le module de Young E .

À partir d'un certain allongement, la courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. La courbe de traction présente ensuite un maximum qui détermine la résistance à la traction conventionnelle R_m .

Le paramètre A % renseigne sur la déformation maximale que l'on peut atteindre de la mise en forme, La rupture a ensuite lieu dans la zone de striction. La charge unitaire σ n'a pas de sens particulier à l'endroit de la rupture puisque la contrainte n'est plus homogène dans l'échantillon.

La courbe de traction rationnelle est, quant à elle, toujours croissante. La striction marque un point d'inflexion, puisque la section diminue plus vite que la force. On note que la contrainte vraie σ atteinte au moment de la rupture est très supérieure à la contrainte nominale σ_n .

III.3.4 Comparaison de la limite élastique et la résistance max avec les limites de la fourchette :

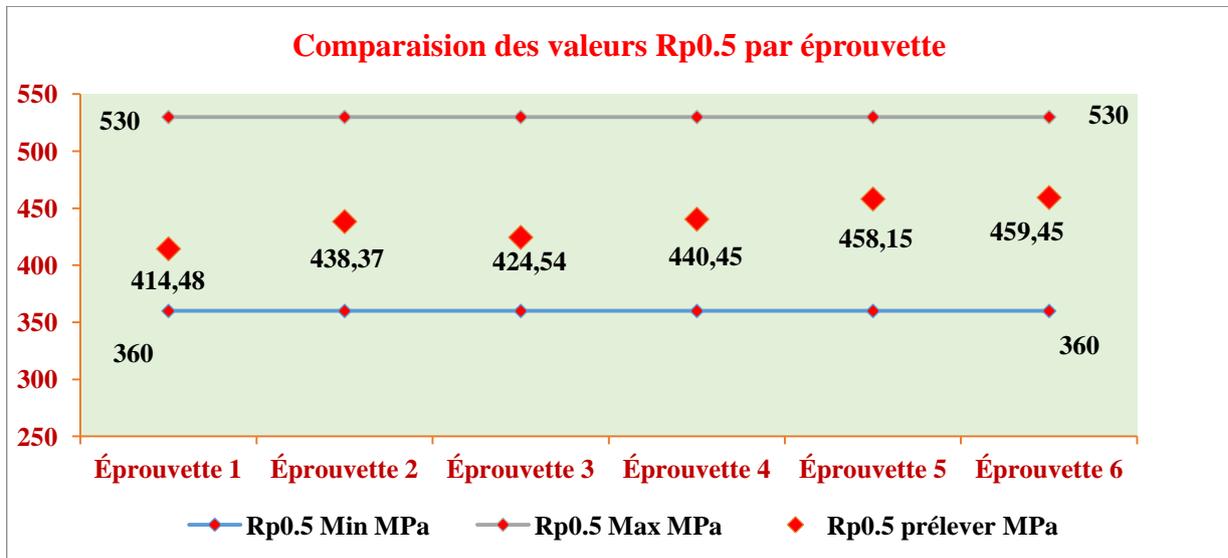


Figure III.11 Comparaison des valeurs de $R_{p0.5}$ par éprouvette.

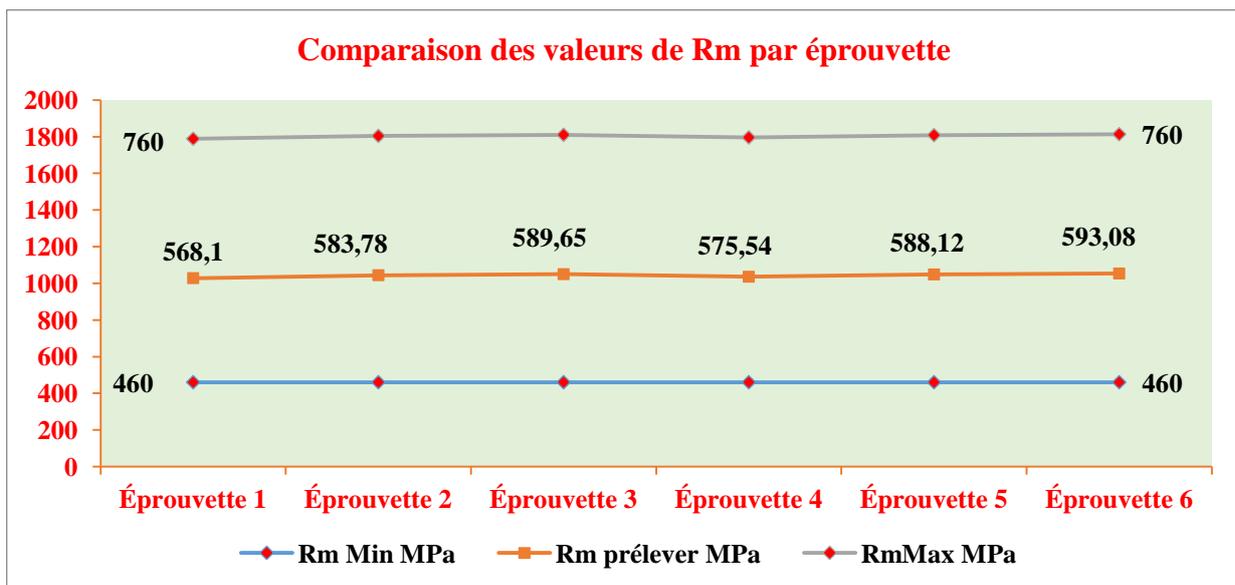


Figure III.12 Comparaison des valeurs de R_m par éprouvette.

- La limite élastique ainsi que la résistance à la rupture sont conformes aux exigences de la norme et du client, d'après notre constatation nous remarquons que les résultats de l'acier fabriqué au niveau SIDER ELHADJER possèdent des propriétés au milieu de la fourchette.
- Les rapports de la limite élastique à la charge de rupture pour chaque éprouvette d'essai sont suffisamment respectés (\leq à 0.779) –Exigence $R_p/R_m \leq 0.85$.

- L'acier API 5L X52Q possède des limites élastiques et à la rupture élevées, Ce qui justifie son utilisation pour la fabrication des tubes des pipelines.
- Certains paramètres sont directement relevés sur la courbe de traction, d'autres sont déduits de ces premiers.
- Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisante car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile. L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction.

III. 4 Essai de résilience :

Résultats d'essai de résilience donnée par TSS :

LABORATOIRE DES ESSAIS MECANIQUES											
Echantillon tube			Dimensions Eprouvette :								Tolérance:
			10 x 7,5 x 55 mm								MIN 27 à 0°C
N°TUBE	REPERE	So (cm²)			W (J)			K			Moyenne des valeurs J/cm²
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
01	AB	0,60	0,60	0,60	9.8	9.6	9.6	160.23	156.96	156.96	158.05
14	AC	0,60	0,60	0,60	8.8	9.4	9.6	143.88	153.69	156.96	151.51
résultat du 1 ^{er} Essai de réalise à 0 °C											
01	AB	0,60	0,60	0,60	9.8	9.8	9.6	160.23	160.23	156.96	159.14
14	AC	0,60	0,60	0,60	9.0	9.2	9.4	147.15	150.42	153.69	150.42
résultat du 2 ^{eme} Essai de réalise à 22 °C											
01	AB	0,60	0,60	0,60	3.8	4.0	4.0	62.13	65.4	65.4	64.31
14	AC	0,60	0,60	0,60	3.2	3.4	3.2	52.32	55.59	52.32	53.41
résultat du 3 ^{eme} Essai de réalise à - 30 °C											
VISA RESPONSABLE LABORATOIRE DE METROLOGIE											
K. MEDJREM											

- Lorsque l'énergie consommée par la rupture est grande, on dira que la rupture est ductile, en revanche lorsque cette énergie est faible on parlera de rupture fragile.
- La résilience dépend fortement de la température et surtout pour les températures inférieures à (0°C).
- Il est intéressant de remarquer que l'acier API 5L X52 est un acier ductile, ce qui justifie également son choix pour la fabrication des pipelines.
- Les mesures se font souvent à diverses températures, notamment à basses températures.
- Cependant, si la simple mesure de la résilience n'est pas compliquée, elle ne procure que des informations qualitatives et ne peut pas être utilisée directement dans un modèle pour dimensionner une structure.
- En revanche elle permet de classer les matériaux ou d'étudier la dépendance de la résilience à la température par exemple.

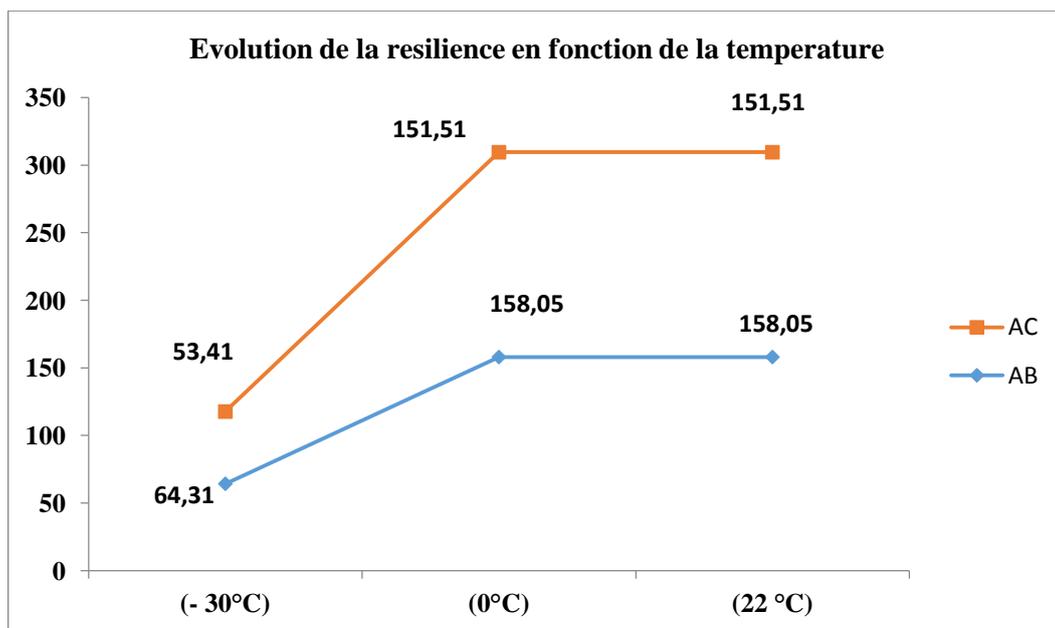


Figure III.13 Evolution de la résilience en fonction de la température

III. 5 Essai de dureté Vickers :

Résultats d'essai de dureté donnée par la TSS.

Enregistrement qualité		
RAPPORT ESSAI DE DURETE		
Type de dureté :	HV	
Moyen utilisé :	Duromètre portatif, SAUTER HO Charge : 20 N, Pénétrateur : Un diamant de 136°	
Client : Interne <input checked="" type="checkbox"/> externe <input type="checkbox"/>	SAHOUR	
Désignation : échantillon X 52 Q		
Référence / coulée	Ø Empreinte (mm)	Dureté HV
AC / 8384	0.21	421
AB / 8368	0.22	366
VISA RESPONSABLE LABORATOIRE DE METROLOGIE		
K. MEDJREM		

Les valeurs de la dureté des deux tubes sont acceptables et ne présentent aucune anomalie. Elles sont conformes aux exigences de la norme.

III. 6 Conclusion

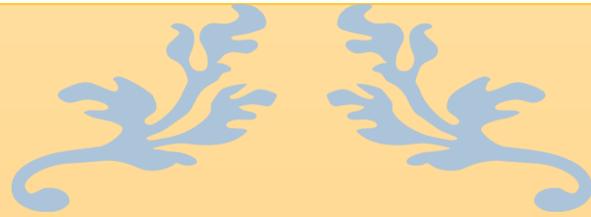
Les résultats obtenus sur plusieurs échantillons de la production TSS montrent :

1- une bonne concentration des résultats des caractéristiques mécaniques (très faible Dispersion) ce qui montre clairement la propreté de l'acier utilisé (Première fusion : Minerai – Fonte – Acier – Tube) contrairement aux difficultés connues chez plusieurs fabricants dans le monde dans la maîtrise de ces paramètres vu la tendance d'utilisation de l'acier de récupération.

2- La chimie utilisée par TSS est bien étudiée et donne des valeurs bien centrées.

3- Le procédé de fabrication utilisé à TSS (Laminage à chaud par le PAS DE PLERIN) ainsi que la maîtrise du traitement thermique gérée par des procédures claires ont permis à la maîtrise de cet acier très demandé dans le domaine du pétrole et gaz. Ces éléments ont permis à l'usine de survivre devant une concurrence mondiale utilisant des techniques très avancées dans la fabrication de tubes sans soudure.

Le chapitre suivant va nous montrer une simulation du comportement de tube en service sous pression.



Chapitre IV

Simulation du tube (TSS) en service



IV.1. Présentation du logiciel ABAQUS :

IV.1.1. Logiciels sur le marché :

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont Nastran, Catia, ABAQUS, ANSYS et Solid Works.

Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec Catia, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec Nastran. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS. [18]

IV.1.2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS, Inc depuis) depuis 30 ans et 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 l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005 (donc si ça vous intéresse vous savez où aller frapper).

ABAQUS 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 (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement).

La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement

peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation:

- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats. [18]

IV.2. Simulation numérique :

- **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 ou 3D.

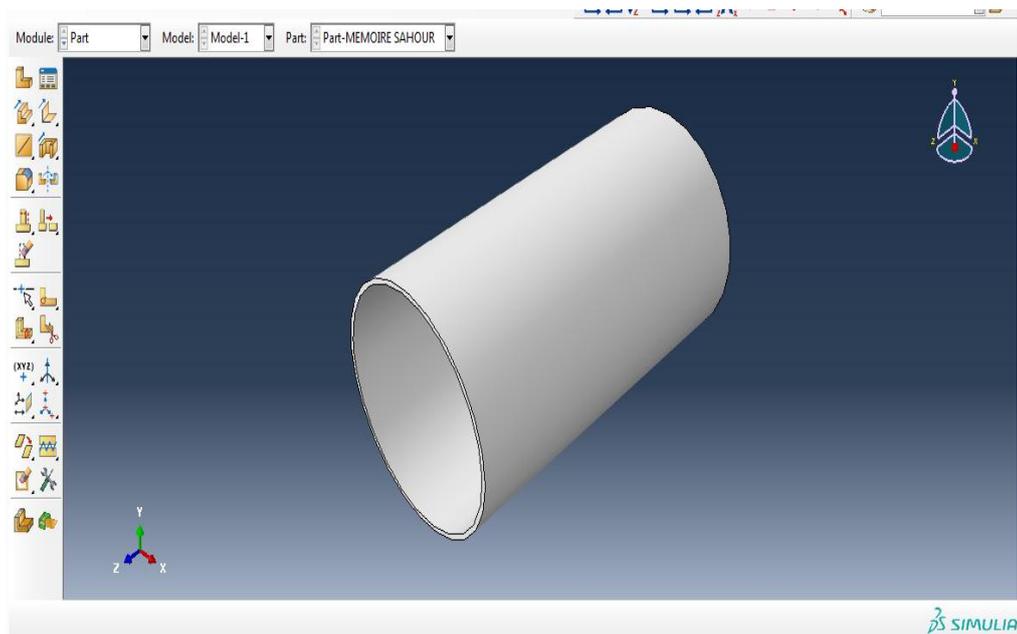


Figure IV. 1 Création du tube

- **Le module « PROPERTY ».**

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

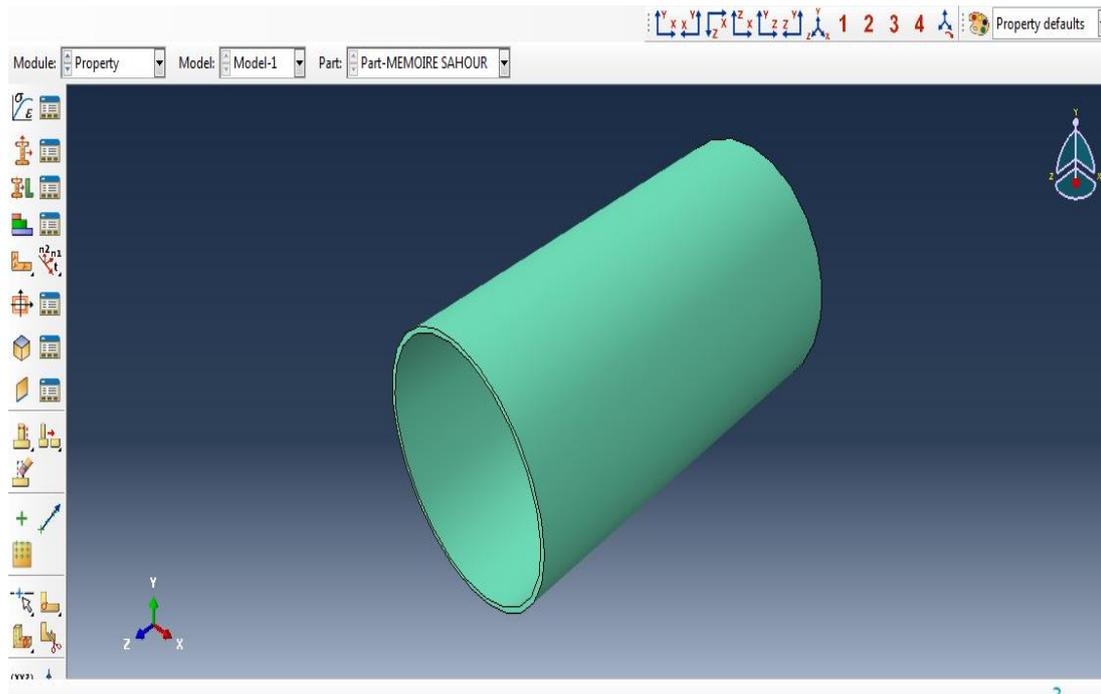


Figure IV. 2 : Tube vert après la définition des propriétés du matériau

- **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 ».**

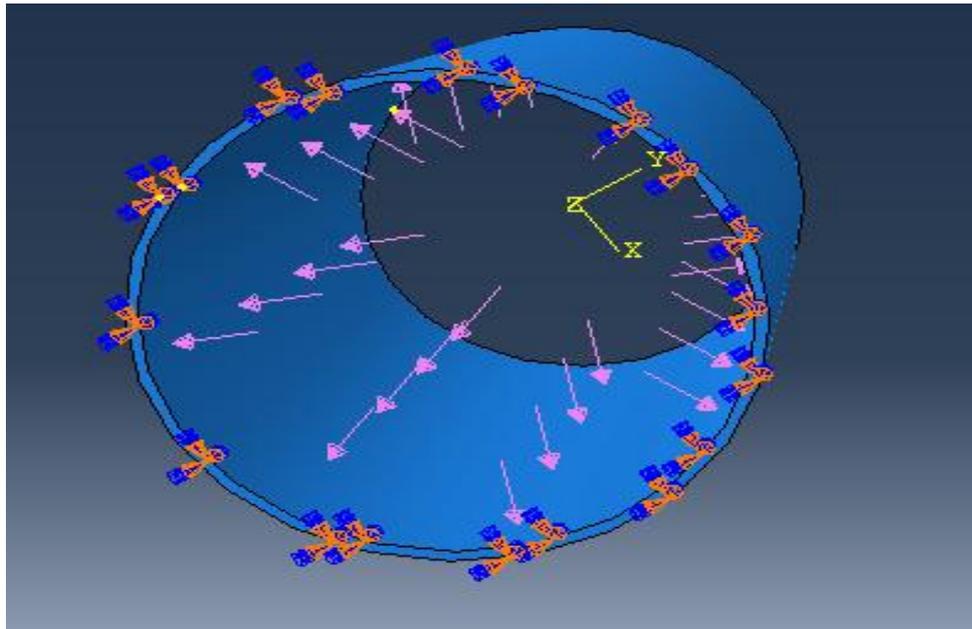


Figure IV. 3 : Présentation de Conditions aux limites de la structure Etudiée et l'application des charges

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.

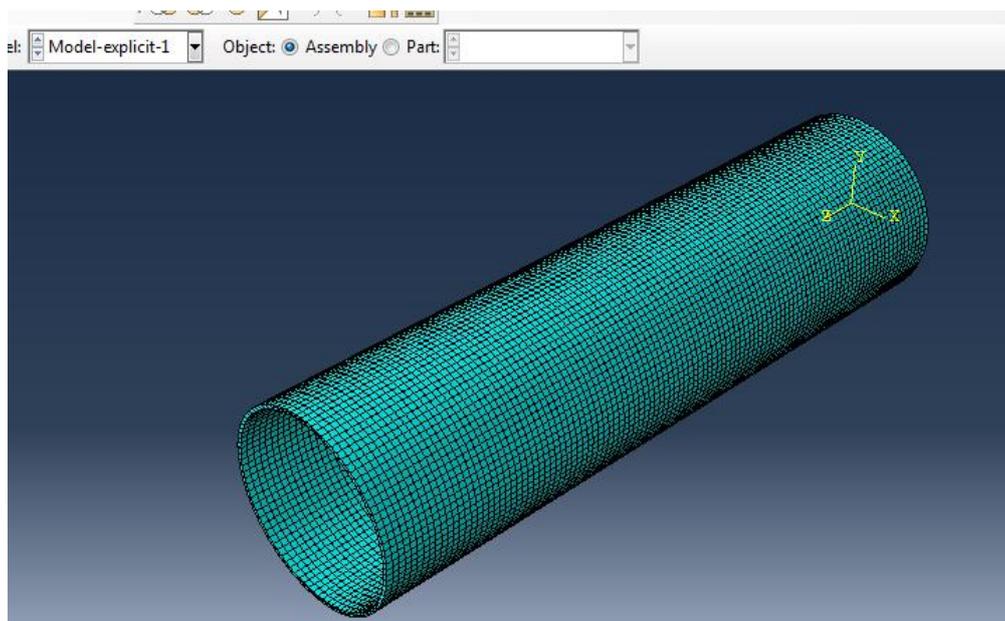


Figure IV. 4 maillages du tube sous pression interne

- **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 Exploration des Résultats :

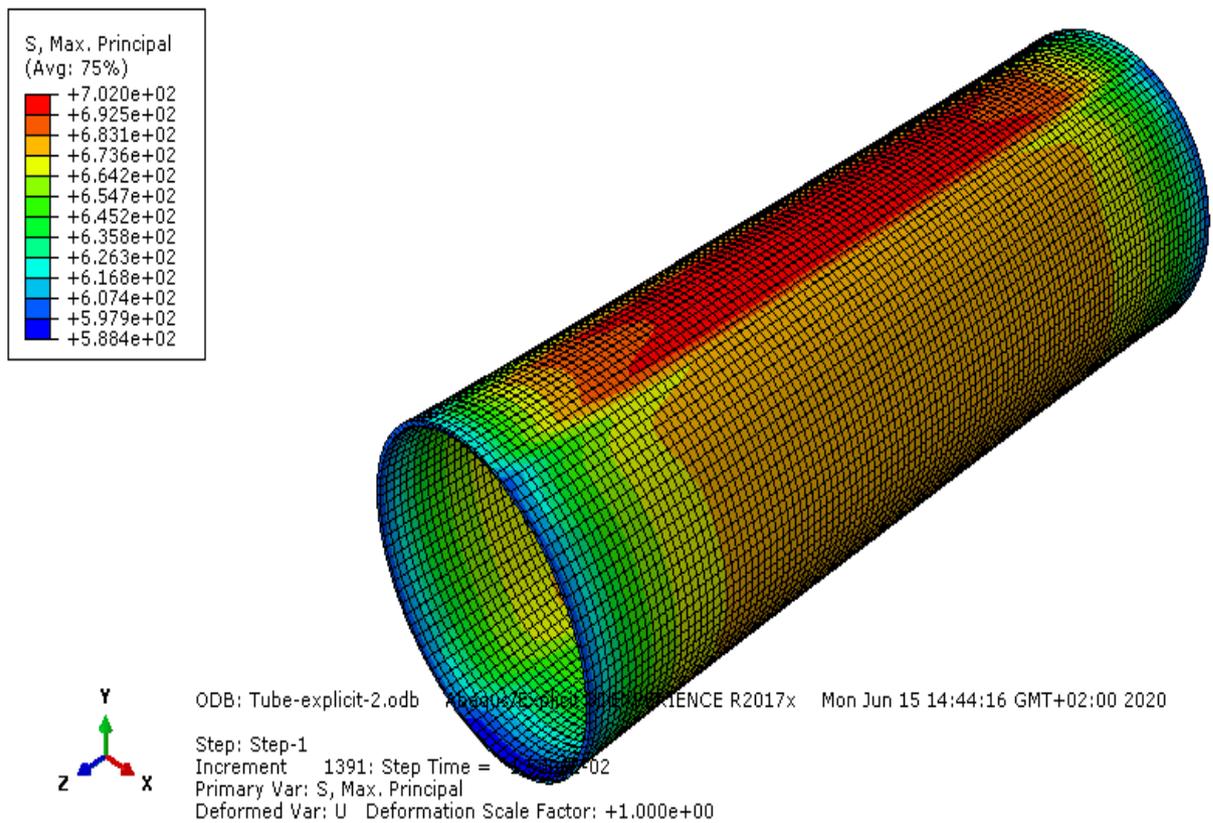


Figure IV.5 Répartition des contraintes sur l'épaisseur du tube

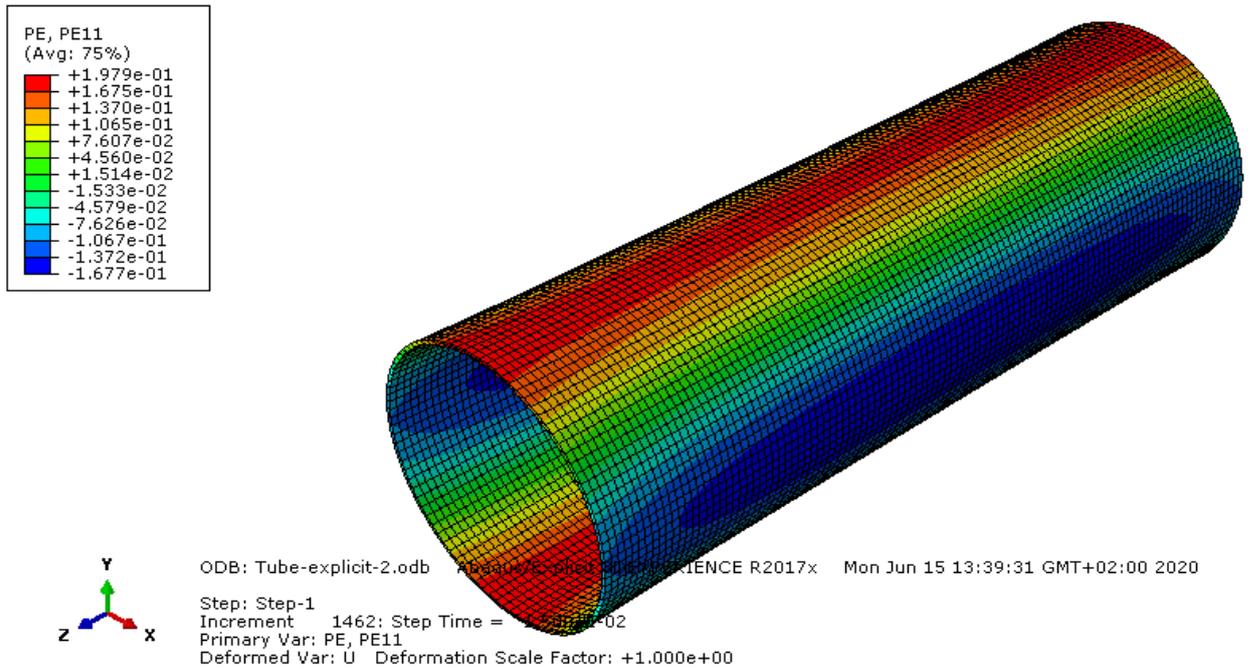


Figure IV.6 Répartition de la déformation plastique sur tube

IV.4.1 Résultats de la simulation :

Calcul de l'épaisseur " e " 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)

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

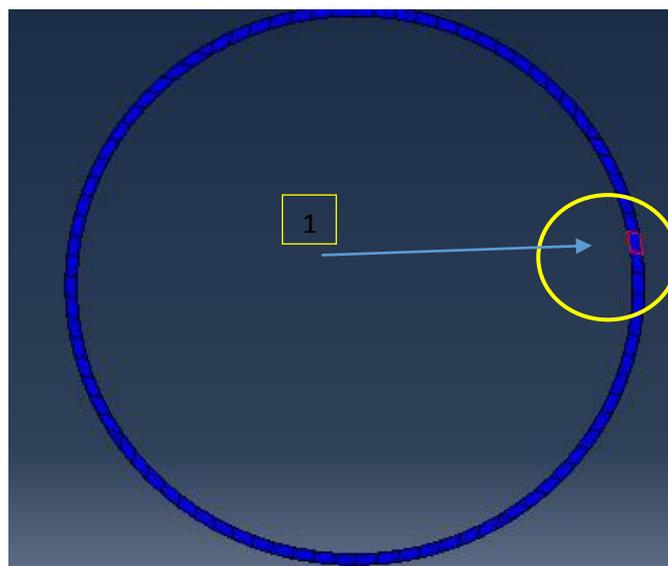


Figure IV.7 Choix d'élément concernés par la déformation PE11 sur la section

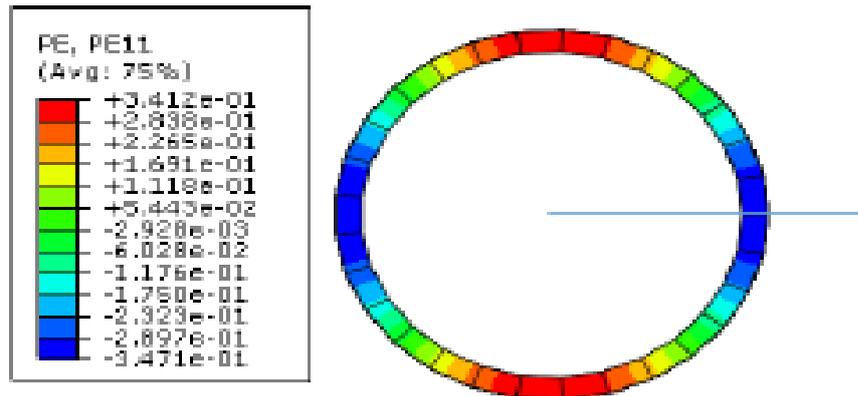
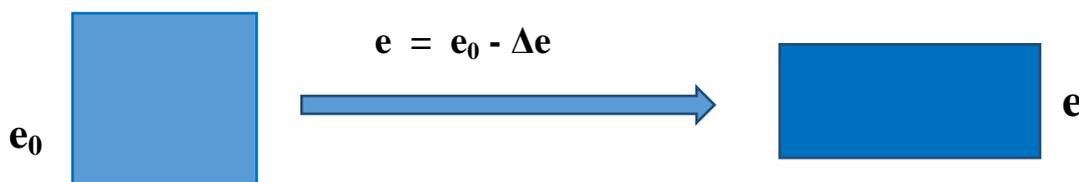


Figure IV.8 Répartition de la déformation plastique sur la section du tube



Épaisseur $e_0 = 11.1$ $e < e_0$

$$\epsilon = \frac{e - e_0}{e_0} \implies e = e_0 (\epsilon + 1) \implies e = e_0 (1 + \epsilon)$$

IV.3.2 Calcul de la Longueur et de l'épaisseur de l'élément en fin de déformation :

$$\epsilon = -0.34 \implies e = 11.1 (1 - 0.34) = 7.326 \text{ mm}$$

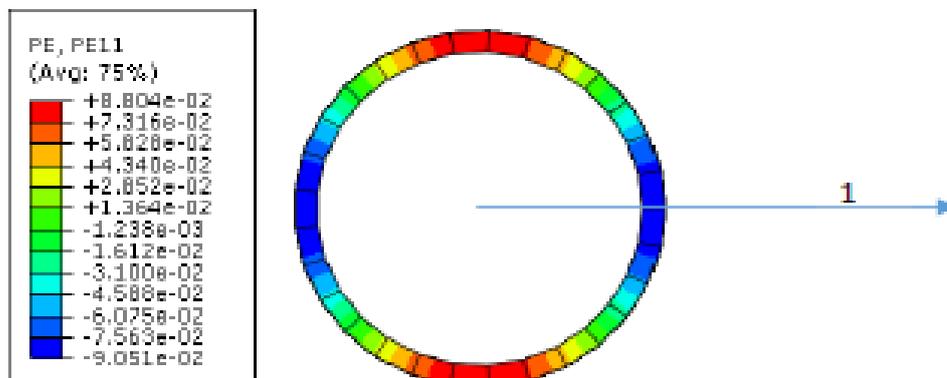


Figure IV.9 État du tube au moment de la première de déformation

$$\epsilon = -0.09 \implies e = 11.1 (1 - 0.09) = 10.10 \text{ mm}$$

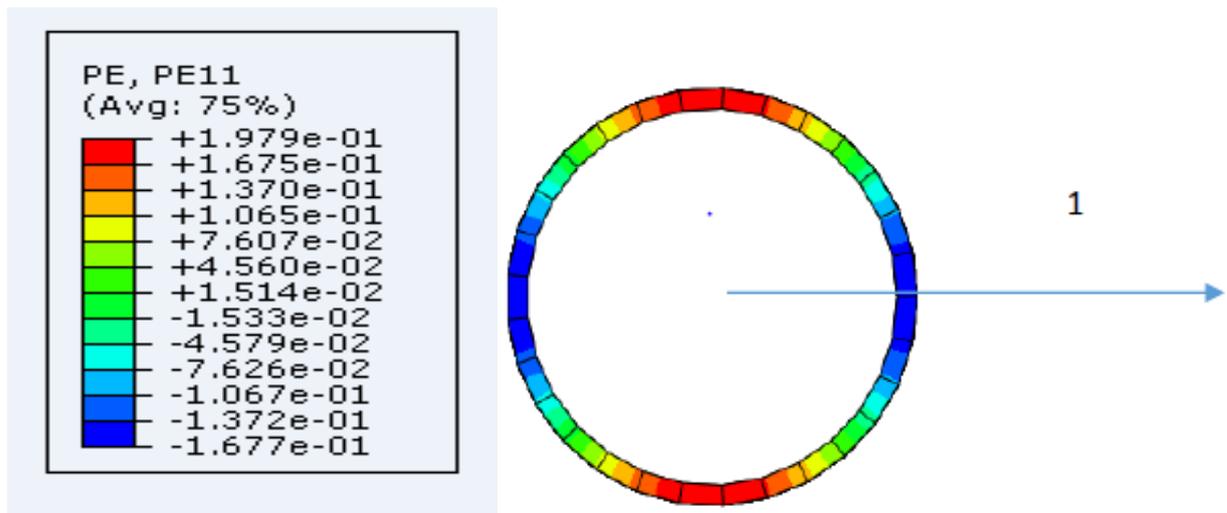


Figure IV.10 État du tube au moment de la deuxième déformation

Déformation suivant l'axe 1

$$\epsilon = -0.16 \longrightarrow e = 11.1 (1 - 0.16) = 9.324 \text{ mm}$$

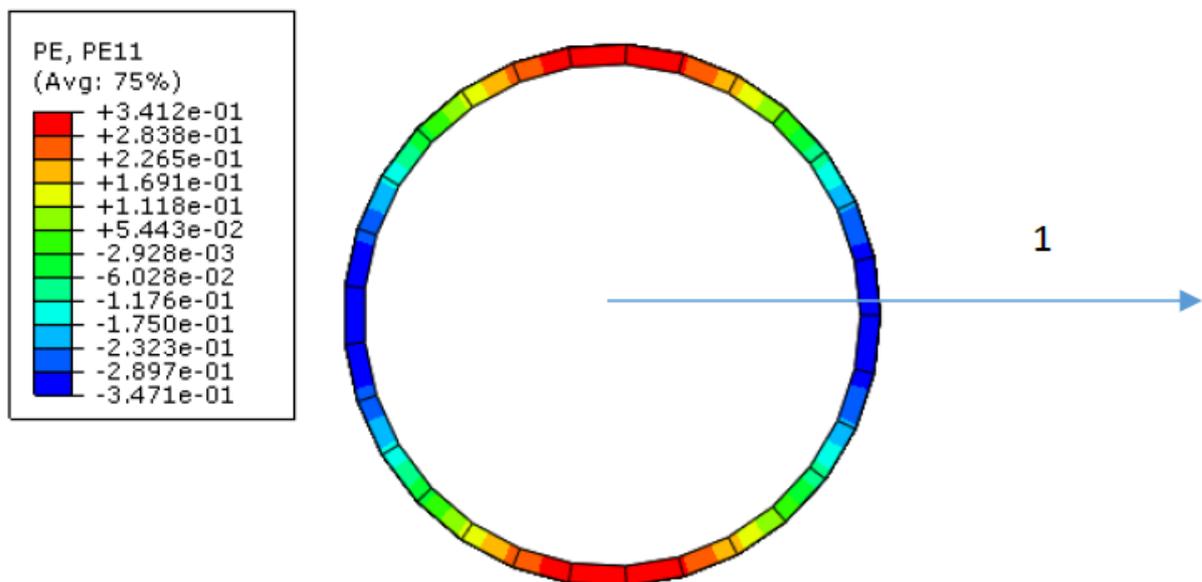


Figure IV.11 État du tube au moment de la déformation à la rupture

Déformation suivant l'axe 1

$$\epsilon = -0.34 \longrightarrow e = 11.1 (1 - 0.34) = 7.326 \text{ mm}$$

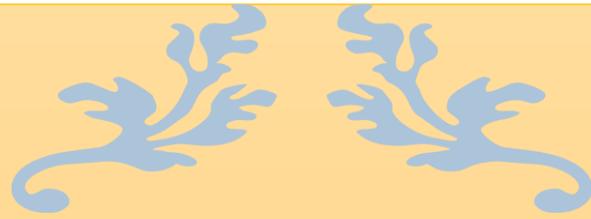
IV.4.3. Conclusion:

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 générale



Conclusion

Le présent travail a permis de mettre en évidence l'importance des essais mécaniques et leurs rôles dans la caractérisation et la vérification des caractéristiques mécaniques d'un acier pour tube destiné au transport des hydrocarbures, qui permettent de déterminer la conformité du produit aux normes et spécification de fabrication.

Nous avons débuté par une étude bibliographique sur les comportement des matériaux et essais mécaniques. Les résultats des essais de tractions montrent pratiquement le même comportement des courbes contraintes déformations sur une série de 6 essais. 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.

Dans cette étude nous avons essayé d'exploiter les résultats des essais mécaniques au maximum afin d'approfondir nos connaissances sur le comportement et les caractéristiques mécanique de l'acier X52Q API-5L.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Afnor, Produits sidérurgique, Aciers pour construction, Recueil de normes françaises, 1988.
- [2] : [Techniques de l'Ingénieur, Étude et propriétés des métaux, mécanique sur les métaux et alliages Réf. Internet : articles 42531 | 2nde édition].
- [3] : [NELI 06] Nélias, D., Boucly, V., Brunet, M. *Elastic-plastic contact between rough Surfaces: proposal for a wear or running-in model*, ASME J. Tribol., 2006, Vol. 128, 9 p.
- [4] : LEMA 88] Lemaître, J., Chaboche, J.L., *Mécanique des matériaux solides*, Paris: Dunod, 1988, 544 p.
- [5] : J.Paulbailon, J.Mariedorlot. « Des matériaux », 3eme édition 2000- 2001.
- [6] : Techniques de l'Ingénieur : Essais mécaniques des métaux (Détermination des lois de comportement) M 120 – 1.
- [7] Document usine N°2, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de traction – NF10002-1 (1990)
- [8] C.D.Thenon, J.Duvalloir, « TRE Instrumentation d'un choc Charpy », École des mines de Paris, (2002).
- [9] : T. Lorriot, J.M .Mongie, B .Coutand, E .Mrtin, J.M.Quenisset, « Effets de sollicitations dynamiques sur le comportement en dommageable de matériaux carbone /carbone », Revue des composites et matériaux avancés, (1997).
- [10] : [Techniques de l'Ingénieur, par Dominique FRANÇOIS *Directeur du Laboratoire des Matériaux École Centrale des Arts et Manufactures*]
- [11] : Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, École des mines, Nancy, Éditons 1988.
- [12] : [Http://Fr.Wikipedia.Org/wiki/Duret% C3%A9 %28mat%C.3%A9riatte 029,](http://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_mat%C3%A9rielle) Catégories: Science des matériaux • Métallurgie • Essai mécanique.
- [13] M. GRUMBACH et al, Métaux, Corrosion, Industrie, 58, 690, 69-74,1983.
- [14] : M. GRUMBACH, "Les essais de dureté" dans Propriétés d'emploi des aciers. Études de bases. C. I. OTUA., 1977.
- [15] : C.TOURNIER, Traitement Thermique, 246, 57-60, 1991.
- [16] M .BELAID, documentation de département technique, TSS, 1993/1994.
- [17] K.KAHOUL, rapport de stage, TSS, ARCELOR Métal, 2016.
-

- [18] Ahmed BENHAMOUDA, « Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne », mémoire magistère, Université Mentouri Constantine, 23 Juin 2010.

-