

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université Badji Mokhtar Annaba
Badji Mokhtar- Annaba University

جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Construction mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

COMPORTEMENT MECANIQUE DE L'ACIER C28 DES
GUIDES-BILLETES EN TRACTION ET
DETERMINATION DES CHAMPS DE CONTRAINTES ET
DE DEFORMATIONS PAR ABAQUS

Présenté par : *Attoui Rania*

Encadrant : *Bey Kamel*

Grade : *Professeur*

Université : *U.B.M. Annaba*

Jury de soutenance:

Président	UBM Annaba	MCB	Benamira Mohamed
Encadrant	UBM Annaba	Prof	Bey Kamel
Expert	UBM Annaba	MCA	Chemami Abdennacer

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Je remercie DIEU de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail

Je remercie mon encadreur Pr. Bey Kamel pour son aide, son encouragement et sa patience ainsi que Dr Bouaricha Amor pour son aide dans le calcul numérique.

Je remercie les membres du jury pour leur évaluation de mon mémoire et je ne remercierai jamais assez tous mes enseignants du département de génie mécanique.

Enfin, un grand remerciement à mes parents.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur encouragement tout au long de mes études.

A mon frère : Rami

A mes amis pour leur appui et leur encouragement.

A tous mes collègues

Sommaire

- Remerciements

- Dédicace

- Introduction générale

Chapitre 01 : Etude bibliographique

1- Introduction.....	1
2- Historique	2
3- Définition du matériau métallique.....	2
4- Structure des métaux et leurs classifications	2
4-1- Métaux ferreux	3
4-2- Métaux non ferreux	3
5- Définition des aciers et leurs classifications	3
5-1- Les aciers au carbone d'usage général.....	3
5-2- Les aciers de traitements thermiques.....	3
5-2-1- Aciers non alliés	3
5-2-2- Aciers alliés.....	4
5-3- Aciers à outil	4
5-4- Aciers inoxydables	4
6- Propriétés mécaniques	4
6-1- Rigidité.....	4
6-2- Elasticité.....	4
6-3- Résistance maximale	4
6-4- Limite élastique	4
6-5- Plasticité.....	5
6-6- Ductilité	5
6-7- Fragilité	5
6-8- Résilience	5
6-9- Ténacité.....	5
7- Principaux essais	5
8- Essais mécaniques et leurs classifications	6

9- Différents types d'essais mécaniques	6
9-1- Essai de dureté.....	6
9-1-1- Types d'essais de dureté	7
9-2- Essai de flexion	9
9-3- Essai de compression	9
9-4- Essai de torsion	10
9-5- Essai de cisaillement	10
9-6- Essai de résilience	11
9-7- Essai de traction	11
9-7-1- Définition de l'essai de traction	11
9-7-2- But de l'essai de traction	12
9-7-3- Diagramme de l'essai de traction	12
10- Mode de chargement	14
10-1- Chargement monotone	14
10-2- Chargement cyclique	15
10-3- Chargement constante.....	15
10-4- Chargement complexe	15
11- Classe du matériau à la rupture	15
11-1- Rupture élastique fragile	15
11-2- Rupture quasi-fragile	15
11-3- Rupture plastique fragile.....	16
11-4- Rupture ductile	16
12- Aspects microscopiques de la rupture	17
12-1- Rupture quasi-fragile	17
12-2- Rupture ductile	18
12-3- Rupture en fluage	19

Chapitre 02 : Etude expérimentale

1- Introduction.....	20
1-1- Problématique	20
1-2- Position du problème	20
2- Analyse du matériau étudié et élaboration des éprouvettes selon la norme	20
2-1- Détermination de la nuance du matériau étudié	20
2-2- Elaboration des éprouvettes	21

3- Bancs d'essais et conditions d'essais	22
4- Mode opératoire des essais de tractions	23
4-1- Courbes expérimentales de comportement mécaniques des éprouvettes testées .	24
4-2- Calcul du module d'élasticité E et de la contrainte à la rupture σ_r	26
4-3- Interprétation des courbes expérimentales de comportement mécanique	28
5- Endommagement du matériau étudié	28
Conclusion	29

Chapitre 03 : Détermination numérique des champs de contraintes et de déformations

1- Introduction	30
2- Définition du logiciel Abaqus.....	30
3- Etapes de simulation de l'essai de traction	31
4- Simulation numérique par Abaqus de l'éprouvette d'essai	32
5- Interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique	35
Conclusion générale	36
Références bibliographiques	37

Liste des figures :

Figure 01 : Pièces en matériaux métalliques.....	2
Figure 02 : Diagramme de comportement	6
Figure 03 : Principe de dureté Brinell	7
Figure 04 : Principe de dureté Vickers	8
Figure 05 : Principe de dureté Rockwell d'une bille en acier trempé (HRB)	8
Figure 06 : Principe de dureté Rockwell d'un cône en diamant (HRC)	9
Figure 07 : Principe d'essai de flexion	9
Figure 08 : Principe d'essai de compression	10
Figure 09 : Principe d'essai de torsion	10
Figure 10 : Principe d'essai de cisaillement	11
Figure 11 : Principe d'essai de traction	12
Figure 12 : Courbe type d'essai de traction	12
Figure 13 : Principe du coefficient de poisson.....	14
Figure 14 : Chargement limite et mode de pilotage du chargement	14
Figure 15 : Chargement cyclique	15
Figure 16 : Classe du matériau à la rupture en sollicitation monotone	16
Figure 17 : Exemple de rupture fragile dans les métaux	17
Figure 18 : Rupture quasi-fragile	18
Figure 19 : Rupture ductile	18
Figure 20 : Endommagement en fluage	19
Figure 21 : Echantillon du matériau étudié	20
Figure 22 : Dessin de définition de l'éprouvette normalisée	21
Figure 23 : Photographie de l'éprouvette normalisée.....	22
Figure 24 : Machine d'essai de traction /Zwick 100KN	22
Figure 25 : Microscope optique Falcon Vision.....	23
Figure 26 : Essai de traction TR1	24
Figure 27 : Essai de traction TR2.....	24
Figure 28 : Essai de traction TR3	25
Figure 29 : Essai de traction TR4.....	25
Figure 30 : Essai de traction TR5.....	26
Figure 31 : Eprouvettes avant et après la rupture	29
Figure 32 : Observation macroscopique de l'éprouvette TR2.....	29

Figure 33 : Observation microscopique	30
Figure 34 : Modèle géométrique	33
Figure 35 : Maillage avec 4150 éléments « hexagonal C3D8R »	34
Figure 36 : Champs de déformations de l'éprouvette selon l'axe Y.....	35
Figure 37 : Champs de contraintes normales.....	36

Liste des tableaux :

Tableau 01 : Classification des essais mécaniques	6
Tableau 02 : Composition chimique du matériau étudié.....	21
Tableau 03 : Dimensions des éprouvettes	21
Tableau 04 : Résultats des essais de traction	26
Tableau 05 : Modules de Young et Contraintes à la rupture des éprouvettes testées	27

Introduction Générale

Introduction générale

Ce travail a pour but de caractériser l'acier dénommé C28 constituant les guides billettes du laminoir à fil et rond (LFR) du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Ces guides billettes s'usent anormalement suite au contact des billettes sortant d'un four à une température de 900°C. L'usure subie par les guides billettes est abrasive et l'arrachement du métal se fait dans le sens du déplacement des billettes lors de leur pénétration dans les cages de laminage du train à chaud. Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique exhaustive sur les matériaux métalliques, leurs propriétés, leurs comportements mécaniques sous différentes sollicitations ainsi que leurs endommagements a été présentée. L'essai de traction pratiqué sur les aciers a été particulièrement mis en exergue dans le but de réaliser une partie expérimentale dans cet axe.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la partie expérimentale relative à l'essai de traction de l'acier C28 dans le but de connaître son comportement mécanique ainsi que son endommagement. La détermination de la composition chimique de ce matériau ainsi que l'élaboration des éprouvettes normalisées ont été réalisées au niveau du complexe sidérurgique d'El Hadjar. Les essais de traction réalisés ont permis de donner un comportement mécanique expérimental s'exprimant par l'obtention des courbes (contraintes - déformations) qui mettent en évidence un comportement parfaitement linéaire suivi d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale et qui se termine par une rupture de nature fragile. Aussi, grâce à la microscopie électronique, on a pu déterminer et confirmer le type de rupture de ce matériau.
- Dans le troisième chapitre, on a présenté un travail sur la simulation numérique en appliquant le logiciel Abaqus. La détermination des champs de contraintes et de déformations sous une charge moyenne de 40.000 N nous a permis de connaître la répartition de ceux-ci sur le modèle géométrique et aussi de comparer les modules d'élasticité numériques et expérimentaux ainsi que les contraintes à la rupture numériques et expérimentales.

Chapitre 01

Etude bibliographique

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, 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 métallique.

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 transports (trains, automobiles), de composants mécaniques (visserie, ressorts, câble, 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 mécanique qu'ils possèdent, ils se partent 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 matière, on parle alors des aciers traités[1].

2- Historique :

Ce n'est pas par hasard que des périodes de la préhistoire portent le nom de certains matériaux métalliques (âge du cuivre, âge du bronze, âge du fer).

Au tout début, les hommes ont découvert des pierres brillantes (minerais) qu'ils ont utilisées comme décoration. Sous l'effet de la chaleur, ils se sont aperçus que ces pierres se déformaient et retrouvent leur état solide à froid.

Le plus ancien des métaux travaillés par l'homme est l'or dont les premières utilisations remontent à 6000 ans avant Jésus Christ. Ensuite vers 4000 ans avant J.C, c'est le cuivre qui est exploité avant de laisser la place au bronze vers 3000 ans avant J.C. Au fur et à mesure, les forgerons ont amélioré leur technique en augmentant les températures de fusion avec de meilleurs fours (vers 1100°C) [2].

3- Définition du matériau métallique :

Le métal est un matériau généralement solide comprenant un ou plusieurs éléments métalliques par exemple (le fer, l'aluminium, le cuivre, le chrome, le titane, l'or, le nickel), et souvent aussi des éléments non métalliques par exemple (le carbone, l'azote, l'oxygène) en quantité relativement faible[3].

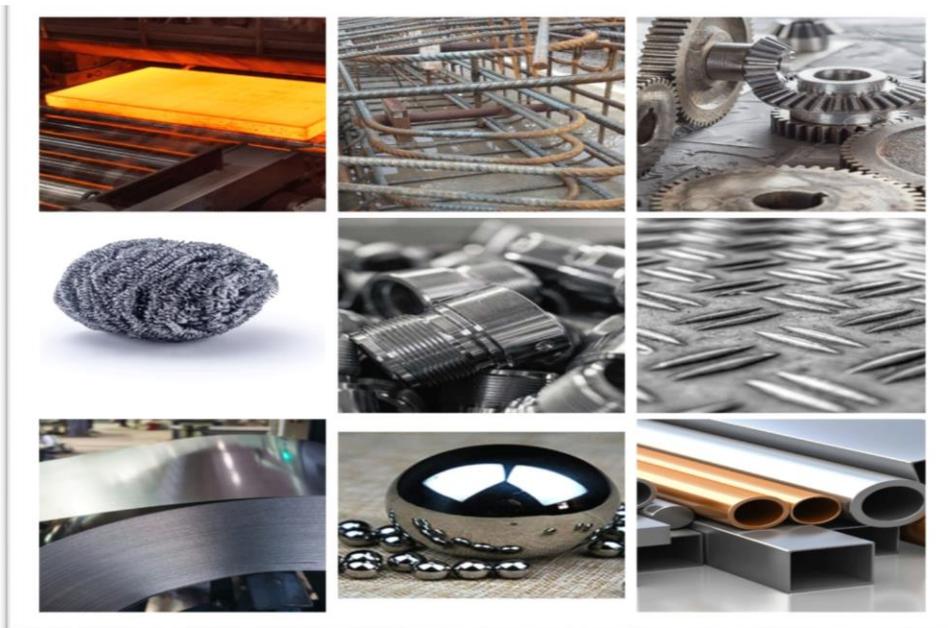


Figure 01 : Pièces en matériaux métalliques[2].

4- Structure des métaux et leurs classifications :

L'observation des métaux montre que ceux-ci ont une organisation interne appelée microstructure. L'utilisation de certaines méthodes d'investigation nous permet de connaître les détails de la structure. Suivant le mode d'observation, on peut distinguer [2] :

Chapitre 01 : Étude bibliographique

- La structure macrographique ou macrostructure.
 - La structure micrographique ou microstructure
- Classe des métaux :

4-1- Métaux ferreux :

Acier, fonte

4-2- Métaux non ferreux :

De base : Cu, Pb, Zn, Sn

Légers : Al, Mg, Ti

Précieux : Au, Ag, Pt

Rares : Be

5- Définition des aciers et leurs classifications:

Les aciers sont essentiellement des alliages de fer et de carbone qui contiennent en outre certains autres éléments introduits en faibles quantités au moment de leur élaboration (dans les aciers alliés, on introduit par exemple des éléments des alliages dans le but de modifier les propriétés des aciers de base) [1].

On peut classer les aciers selon la composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. C'est cette dernière classification qui nous permet de considérer les quatre familles suivantes[4] :

5-1- Les aciers au carbone d'usage général :

Les aciers au carbone d'usage général constituent environ 85% de la production des aciers. Ce sont des matériaux produits en très grande quantité et dont le prix est relativement bas. Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition (manganèse, silicium...) et des impuretés (soufre et phosphore) dont la présence découle de leur mode d'élaboration.

5-2- Les aciers de traitement thermique :

Les aciers alliés ou non alliés de traitements thermiques sont définis en fonction de leur composition. La composition chimique de ces aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.

5-2-1- Aciers non alliés :

Ces aciers sont, en fait, intermédiaires entre les aciers d'usage général de type A et les aciers fins de type XC, on peut leur faire subir un traitement thermique, mais les caractéristiques mécaniques obtenues peuvent être assez variables d'un lot à l'autre et même à l'intérieur d'un même lot.

5-2-2- Aciers alliés :

On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

- **Acier faiblement allié** : ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.
- **Acier fortement allié** : dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5%.

5-3- Aciers à outil :

Ce sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, outils de coupes, cisailles, marteaux, burins, etc. Les caractéristiques d'utilisation des aciers à outils sont semblables à celles des aciers alliés, mais elles exigent l'amélioration d'un certain nombre de propriétés : la dureté, la trempabilité, la tenue à chaud, la ténacité, la résistance et la résistance aux chocs thermiques.

5-4- Aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12%, rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface.

6- Propriétés mécaniques :

Ce sont des propriétés relatives aux aspects de résistance aux efforts, des déformations résultantes des efforts, des contacts entre solides (chocs, glissement ...)[5].

6-1- 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.

6-2- 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.

6-3- Résistance maximale :

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau. La charge peut être un effort en traction ou un couple en torsion.

6-4- Limite élastique :

Chapitre 01 : Étude bibliographique

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.

6-5- Plasticité :

C'est la déformation d'un matériau sous une charge sans revenir à son état initial après décharge.

6-6- 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.

6-7- Fragilité :

C'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau fragile se déformant plastiquement.

Remarque : La ductilité et la fragilité sont deux notions opposées qui peuvent être exprimées par :

- L'allongement à la rupture A%
- Le pourcentage de striction Z%

6-8- Résilience :

La résilience est déterminée par essai Charpy ou essai Izod.

6-9- 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 ».

7- Principaux essais :

Essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...)

Essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...)

Essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...)

Essais sur les fluides (viscosité, écoulements...)[6].

8- Essais mécaniques et leurs classifications :

Lors d'un essai mécanique, un matériau peut réagir de différentes manières :

- Par échauffement thermique.

- Par déformation élastique.
- Par déformation plastique.
- Par formation et croissance de microcavités[7].

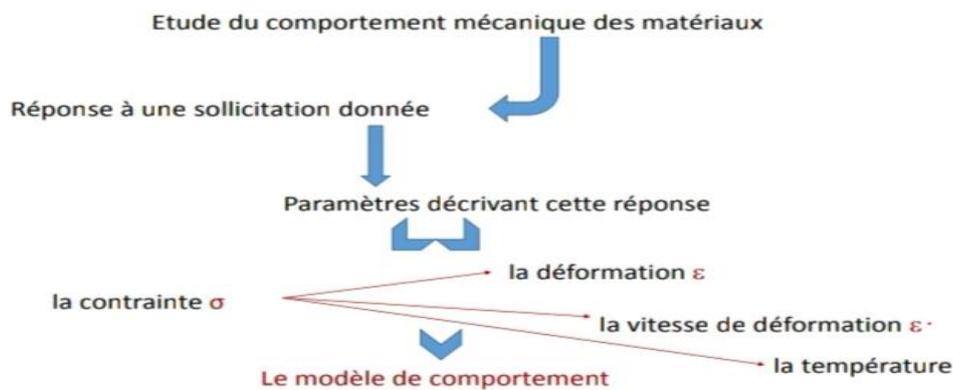


Figure 02 : Diagramme de comportement[7]

-Les essais mécaniques sont classés en deux grandes familles : les essais destructifs nécessitant des éprouvettes d'essais et les essais non destructifs pouvant être directement appliqués sur la pièce à étudier. On distinguera [8] :

Tableau 01 : Classification des essais mécaniques[8]

Destructifs	Non destructifs
L'essai de traction	L'essai de fatigue ou d'endurance
L'essai de compression	L'essai de fluage
L'essai de résilience	L'essai de dureté

9- Différents types d'essais mécaniques :

9-1- Essai de dureté :

La dureté est la résistance mécanique d'un matériau (éprouvette) à la pénétration mécanique d'un autre corps plus dur (pénétrateur).

Le matériau le plus dur est le diamant. Celui-ci est utilisé comme pénétrateur (diamant industriel).

Aucune valeur définie de dureté n'est proposée. La valeur de dureté déterminée dans le cadre d'un essai de dureté peut dépendre des paramètres suivants :

- Le choix de la méthode d'essai
- La force d'essai appliquée sur le pénétrateur
- Le temps de maintien du pénétrateur dans le matériau
- La géométrie du pénétrateur
- La géométrie de la pièce usinée

Chapitre 01 : Étude bibliographique

Pour réaliser les essais de dureté sur matériaux métalliques, les principales méthodes utilisées s'appuient sur l'application d'une force statique [9].

9-1-1- Types d'essais de dureté :

- Dureté de Brinell (HB) :

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F à un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre $D=10$ mm[9].

$$HB = \frac{\text{charge d'essai (daN)}}{\text{aire de l'empreinte (mm}^2\text{)}}$$

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

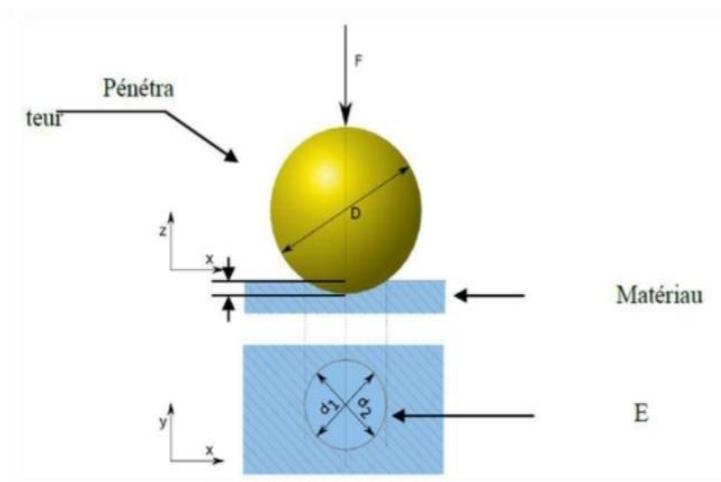


Figure 03 : Principe de dureté Brinell [9]

- Dureté de Vickers (HV) :

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égales à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré. On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la dureté de l'appui sont également normalisées[9].

$$HV = \frac{\text{charge d'essai (daN)}}{\text{aire de l'empreinte (mm}^2\text{)}}$$

$$HV = \frac{P}{\frac{d^2}{2} \sin\left(\frac{136}{2}\right)} = \frac{1,854P}{d^2}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

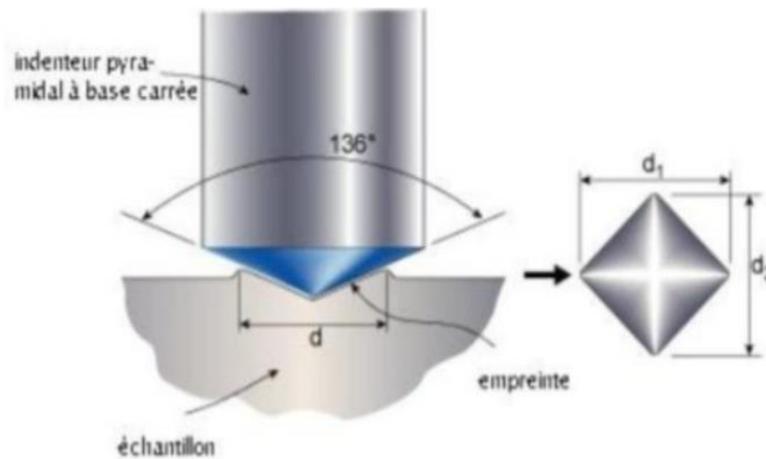


Figure 04 : Principe de dureté Vickers [2]

- Dureté de Rockwell (HR) :

L'essai de dureté Rockwell est un essai de pénétration. Il existe plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant (HRC) ou d'une bille en acier trempé polie (HRB). Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge [9].

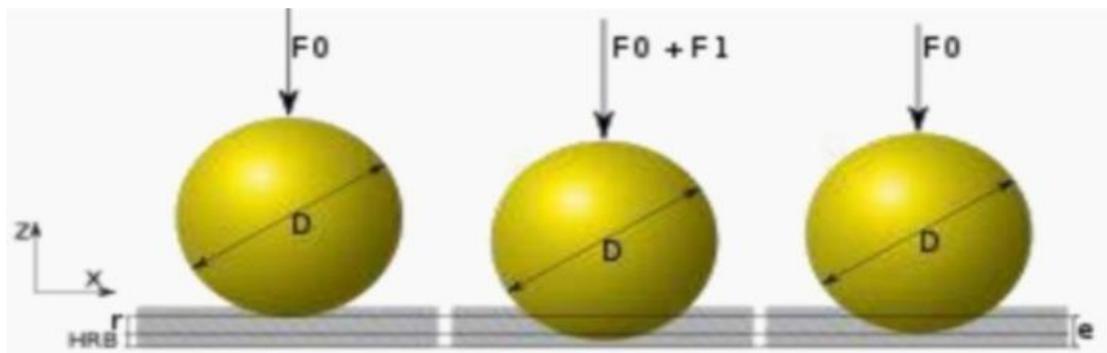


Figure 05: Principe de dureté Rockwell d'une bille en acier trempé (HRB) [9]

$$HRB = 130 - e$$

e : déformation rémanente

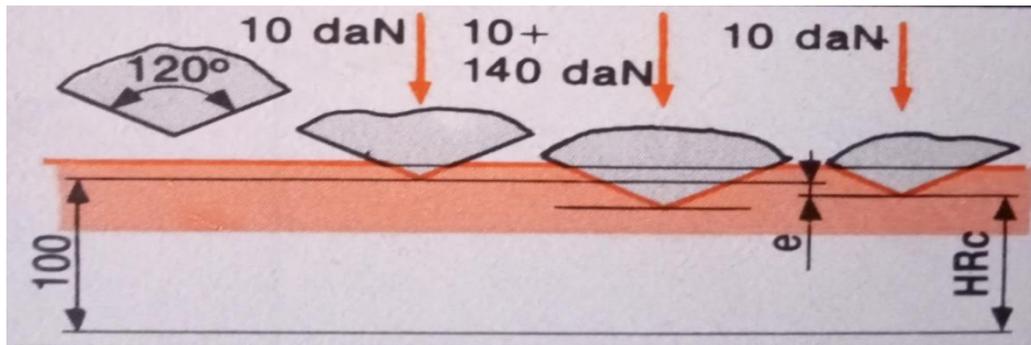


Figure 06 : Principe de dureté Rockwell d'un cône en diamant (HRC)

$$HRC=100-e$$

e : déformation rémanente

9-2- Essai de flexion :

Le cas de charge de flexion le plus étudié dans les essais des matériaux est l'essai de flexion à trois points. Il s'agit d'étudier une poutre logée sur deux appuis, et soumise au milieu à une charge unique. L'essai de flexion démontre le rapport qui existe entre la charge appliquée sur une poutre en flexion et sa déformation élastique. Il met en évidence l'influence exercée par le module d'élasticité et le moment d'inertie géométrique [10].

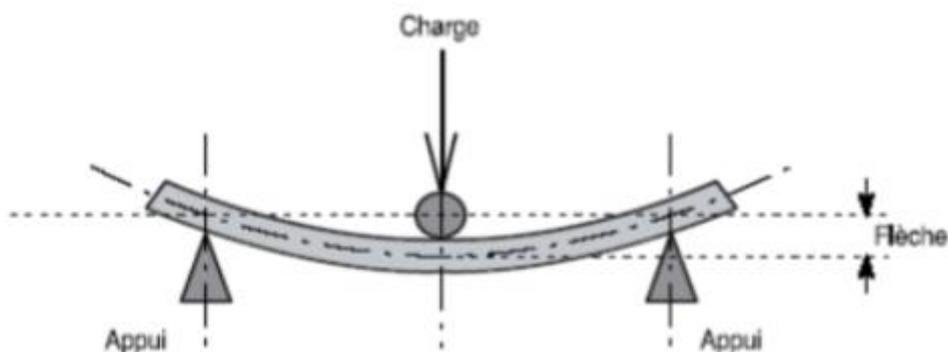


Figure 07 : Principe d'essai de flexion [2]

9-3- Essai de compression :

Les essais de compression tiennent une place moins importante que les essais de traction dans le contrôle des matériaux métalliques. Mais ils sont toutefois essentiels pour l'étude des matériaux tels que les pierres naturelles, les briques, le béton, le bois de chauffage, etc. Lors de ces essais, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue est soumise à une force de croissance faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture. L'éprouvette présente un état de contrainte axiale. Le diagramme contrainte-écrasement met très bien en évidence les différences de comportement des matériaux, et fournit les valeurs caractéristiques de

résistance à la compression, de limite d'écrasement à 0,2%, ainsi que de la contrainte de fluage de compression[10].

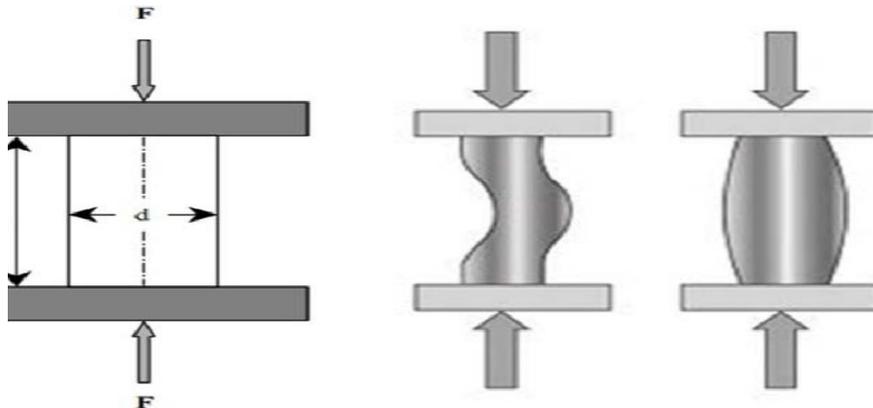


Figure 08 : Principe d'essai de compression[2]

9-4- Essai de torsion :

Les composants soumis à des mouvements rotatifs sont sollicités en rotation. Cette rotation est également appelée torsion. La résistance de torsion déterminée par l'essai de torsion sert d'orientation pour connaître la sollicitation admissible du matériau. Cette méthode est utilisée pour les arbres, axes, fils métalliques et ressorts, ainsi que pour évaluer le comportement de ténacité des aciers à outils[10].



Figure 09 : Principe d'essai de torsion[2]

9-5- Essai de cisaillement :

L'essai de cisaillement est utilisé pour le contrôle des vis, rivets, tiges et clavettes, et sert à déterminer la résistance au cisaillement du matériau ou le comportement du matériau en cas de sollicitation de cisaillement. A cet effet, on génère des contraintes de cisaillement dans l'éprouvette, en lui appliquant des efforts tranchants externes jusqu'à ce qu'elle se cisaille. Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance d'un matériau à la sollicitation de cisaillement : la méthode de test à simple section, et la méthode de test à double section[10].

Cisaillement

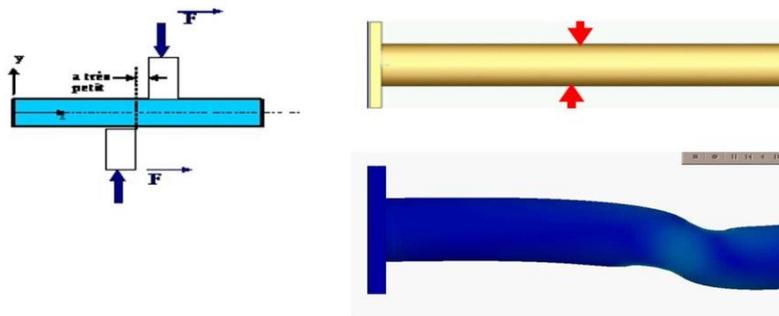


Figure 10 : Principe d'essai de cisaillement[2]

9-6- Essai de résilience :

L'essai de résilience est une méthode avec sollicitation brutale, essentiellement adaptée à la détermination de la tendance à la rupture de fragilité ou de la propriété de ténacité d'un matériau. La méthode d'essai ne fournit pas de valeurs caractéristiques du matériau. Les valeurs de résilience déterminées au cours de l'essai de résilience ne sont pas directement utilisées pour calculer la résistance, elles aident uniquement à choisir des matériaux pour des applications spécifiques.

Le comportement de déformation est souvent un critère important de sélection des matériaux. Il permet de déterminer rapidement lesquels parmi les matériaux sélectionnés sont cassants ou solides. La fragilité d'un matériau ne dépend pas seulement de lui, elle est également influencée par des données extérieures telles que la température ou l'état de contrainte.

Différentes méthodes d'essai sont utilisées pour déterminer la résilience. Pour l'essai Charpy, le corps d'essai est maintenu sur deux cotés, et le pendule entre en contact avec le corps d'essai au milieu, à la hauteur de l'entaille. Pour les méthodes d'essais Izod et Dynstat, le corps d'essai est à la verticale, et le pendule entre en contact avec l'extrémité libre du corps d'essai, au-dessus de l'entaille[10].

9-7- Essai de traction :

9-7-1- Définition de l'essai de traction :

L'essai le plus courant permettant de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction, jusqu'à sa rupture suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante[11].

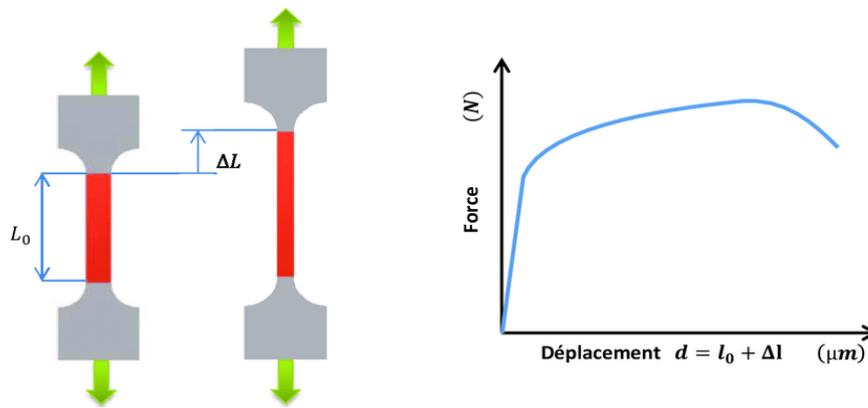


Figure 11 : Principe d'essai de traction[11]

9-7-2- Le but de l'essai de traction :

L'essai de traction a pour but l'évaluation des caractéristiques d'un matériau. L'essai consiste à exécuter sur une éprouvette de forme cylindrique des forces croissantes qui vont la déformer progressivement puis la rompre[12].

9-7-3- Diagramme de l'essai :

Voilà la courbe que l'on obtient lors d'un essai de traction d'une éprouvette en acier.

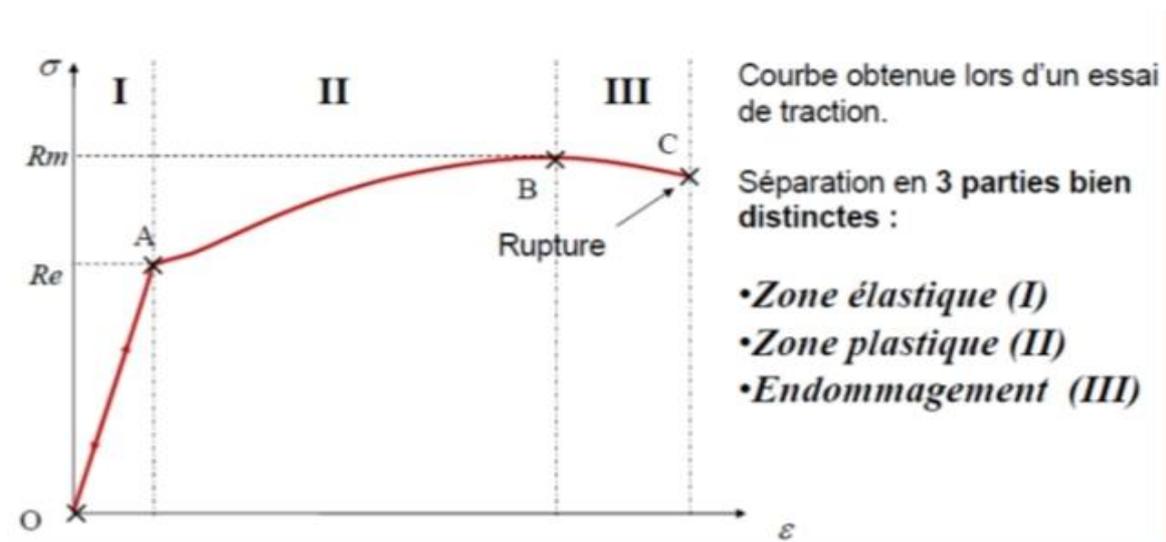


Figure 12 : Courbe type d'un essai de traction[13]

- Le domaine élastique (I) :

- Tous les matériaux disposent d'un domaine élastique :
- C'est un comportement élastique réversible : le matériau s'allonge quand on tire dessus et l'arrêt de la traction entraîne un retour élastique du matériau à son état d'origine aucune déformation définitive.
- C'est une zone dans laquelle la contrainte σ est fonction de la déformation ε : comportement linéaire de pente E, module d'Young en N/m^2 .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- La fin de la zone élastique marque la fin du comportement linéaire du matériau.
- Elle a lieu pour une contrainte appelée limite élastique du Matériau et notée R_e : contrainte maximale avant déformation définitive de la matière en (MPa). R_e correspond au seuil d'écoulement plastique.

Si $\sigma < R_e$ alors aucune déformation définitive du matériau

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

- Le domaine plastique (II) :

Dans ce secteur, il y a déformation définitive du matériau, il ne revient plus dans son état initial. Plus la contrainte augmente, plus la déformation est importante. La fin de ce domaine se situe pour une contrainte que l'on considèrera comme contrainte maximum admissible par le matériau avant sa casse. Il s'agit de la contrainte R_m : contrainte à rupture ou résistance mécanique à rupture (en MPa)

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

- Zone d'endommagement (III) :

Dans cette zone, le matériau commence à se détériorer Irrémédiablement (fissures).

La rupture peut intervenir à tout moment (et sans prévenir...) Un matériau ayant une rupture reste quand même élastique. Sa longueur finale à rupture est exprimée en % de sa longueur initiale : $A\%$: allongement à rupture

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

- Coefficient de Poisson :

Tout matériau qui va s'allonger dans un sens va forcément se 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 transversal, on peut exprimer le coefficient de Poisson[13] :

$$\nu = \frac{\frac{d_0 - d}{d_0}}{\frac{L - L_0}{L_0}}$$

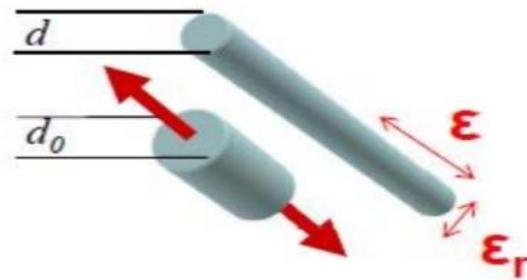


Figure 13 : Principe du coefficient de poisson[13]

- Striction à la rupture:

$$Z\% = 100 \times \frac{s_0 - s_f}{s_0}$$

10- Modes de chargement :

On distingue plusieurs modes de chargement des structures : (i) chargement monotone, (ii) chargement cyclique, (iii) chargement constant. Chaque mode de chargement correspond à un mode de ruine particulier.

10-1- Chargement monotone :

Dans ce cas le chargement croit de façon continue. Le chargement peut consister en un déplacement imposé ou une charge imposée. Dans le cas linéaire (élasticité) les deux cas sont similaires. Dans le cas d'un comportement plastique, il existe une charge limite que la structure ne peut pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force, il y a rupture brutale par instabilité plastique (figure 14). Il peut s'agir, par exemple, du cas d'un réservoir dont on augmente la pression.

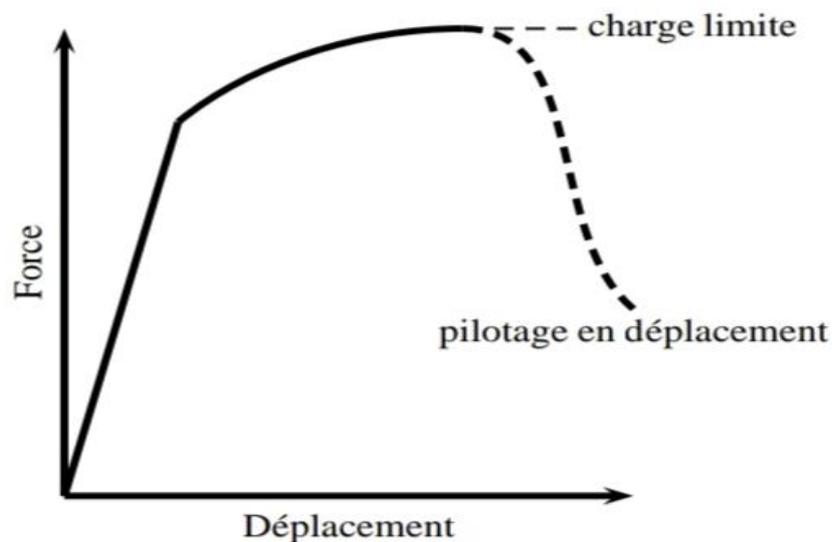


Figure 14 : Charge limite et mode de pilotage du chargement [14]

10-2- Chargement cyclique :

La charge ou le déplacement varie de façon cyclique au cours du temps. La rupture est différée, elle n'interviendra qu'au bout d'un nombre de cycles dépendant de la sévérité du chargement (figure 15). On parle de fatigue. De nombreuses structures sont sollicitées en fatigue : moteurs, pneus, ailes d'avions, hélices de bateau etc.

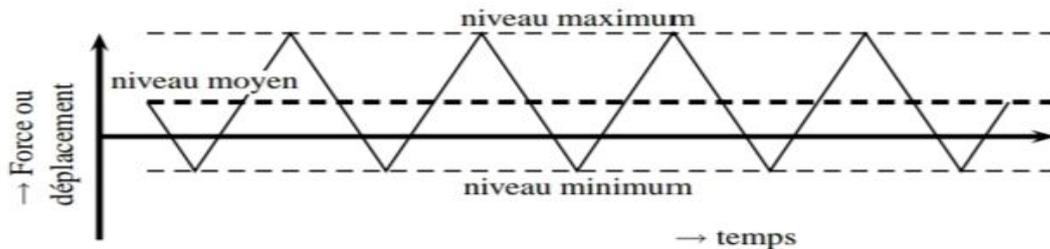


Figure 15 : Chargement cyclique[14]

10-3- Chargement constant :

Dans ce cas une charge constante est appliquée sur une structure généralement à haute température, dans ce cas la structure flue. On se trouve également dans un cas de rupture différée.

10-4- Chargements complexes :

Dans certains cas, le chargement peut être plus complexe que dans les cas précédents. Une structure à haute température peut voir son niveau de charge varier au cours du temps. On parle alors d'interaction fatigue– fluage. Une structure en fatigue dans laquelle se propage lentement une fissure peut subir une surcharge qui entraîne la rupture en charge limite.

11- Classe de matériau à la rupture :

Pour un essai sous chargement monotone d'une éprouvette de traction simple, on peut distinguer différents types de mode de rupture (figure 16) :

11-1- Rupture élastique– fragile :

Le comportement global est linéaire élastique et la rupture intervient de façon brutale (sans signes précurseurs). Les déformations à rupture sont généralement faibles (< 1%). Les matériaux ayant ce type de comportement sont les céramiques massives, les verres.

11-2- Rupture quasi– fragile :

Le comportement global est non linéaire. Des décharges partielles indiquent une forte perte de rigidité qui indique une micro– fissuration du matériau. Cette micro– fissuration est la cause essentielle de la non- linéarité globale. Les matériaux ayant ce type de comportement sont :

- **Les composites** : En particulier les composites céramique – céramique.
- **Les bétons** : On observe ce comportement en compression. En traction les bétons ont généralement une rupture élastique– fragile. Les nouveaux bétons renforcés ont également une rupture quasi– fragile en traction.

11-3- Rupture plastique– fragile :

Le matériau plastifie mais rompt brutalement pour des déformations relativement faibles. C'est le cas des métaux de type cubique centré ou hexagonal lorsque la température est suffisamment faible.

11-4- Rupture ductile :

Le matériau plastifie et rompt progressivement. Une fissure stable peut s'amorcer au sein de la matière. L'endommagement peut- être diffus et relativement important. Les métaux cubiques à faces centrées ont ce comportement. Les métaux de type cubique centré sont ductiles pour une température suffisamment élevée.

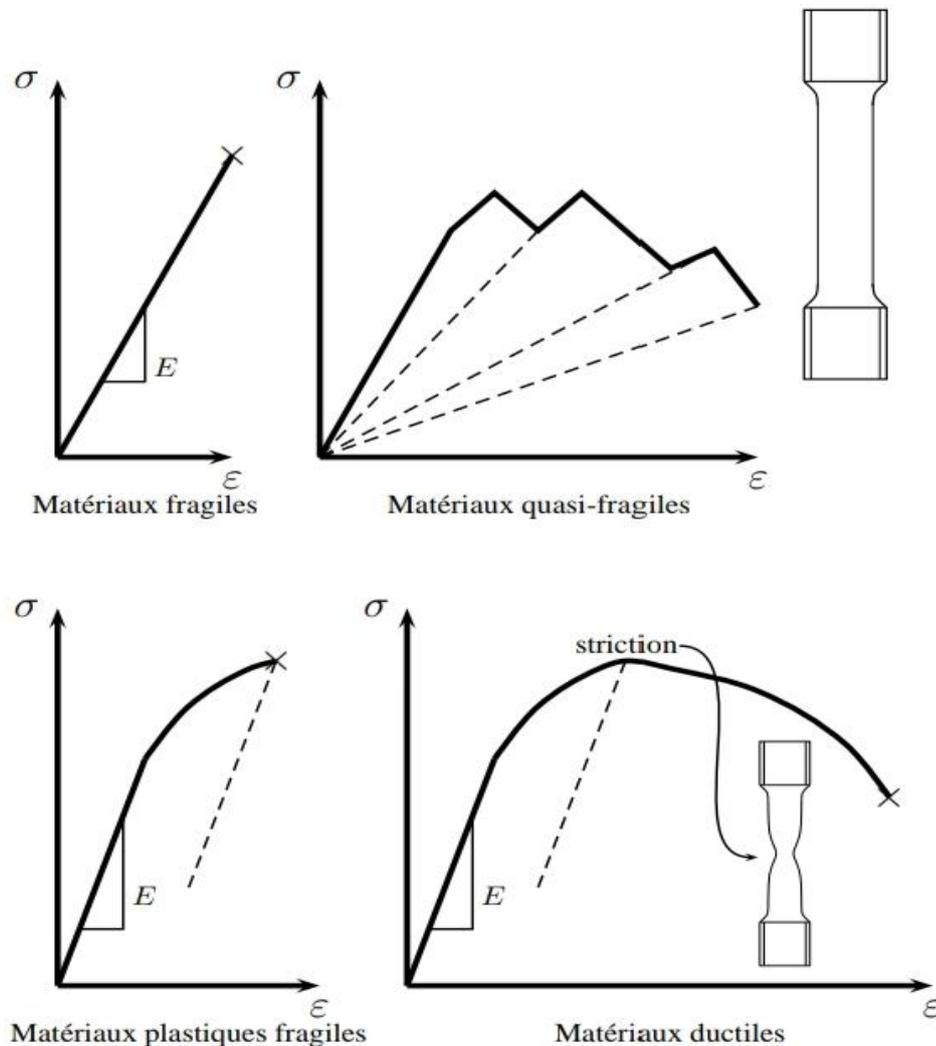


Figure 16 : Classe du matériau à la rupture en sollicitation monotone[14]

12- Aspects microscopiques de la rupture :

Dans cette partie, les faciès de rupture correspondant aux différents modes de rupture ainsi qu'aux différents matériaux sont présentés. L'observation des faciès est importante pour déterminer l'origine de la rupture. Elle peut se révéler très utile lors d'expertises de pièces ayant rompu. Compte tenu de la diversité des modes de rupture des matériaux, les exemples suivants ne prétendent pas à l'exhaustivité.

De manière générale, les faciès de rupture peuvent être examinés à deux échelles différentes : (i) faciès macroscopique à l'échelle de la pièce, (ii) faciès microscopique à l'échelle de la microstructure. Les deux observations peuvent contribuer à la détermination des modes de rupture.

- **Pour les métaux :**

La (figure 17) illustre la rupture fragile des métaux. Deux modes de ruptures peuvent être observés : le clivage qui correspond à une rupture intra granulaire et la rupture inter granulaire. Cette dernière est moins fréquente mais peut être observée en cas de ségrégation (par exemple de S ou P) aux joints de grain. Le faciès macroscopique est souvent plat et lisse.

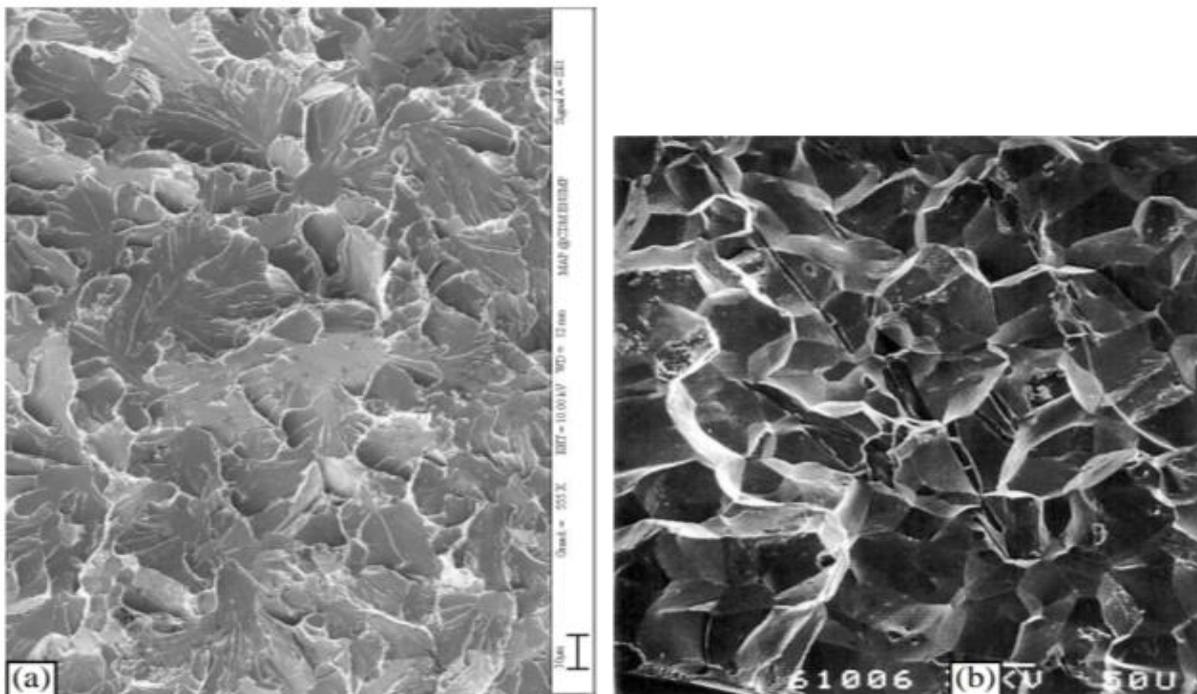


Figure 17: Exemple de rupture fragile dans les métaux (a) : rupture en clivage (intra-granulaire) ; (b) rupture inter-granulaire[14]

12-1- Rupture quasi- fragile :

La (figure 18) donne un exemple de rupture d'un composite Sic- Sic, c'est-à-dire d'un composite contenant des fibres de carbure de silicium (Sic) maintenues par une matrice de Sic déposée en phase vapeur. On constate une fissuration de la matrice, un déchaussement des

fibres ainsi que la rupture des fibres. La rupture de l'interface fibre/matrice permet de dévier des fissures apparues dans la matrice et favorise un endommagement diffus. Le frottement fibre/matrice lors du déchaussement est également un phénomène dissipatif qui permet d'augmenter la résistance du matériau.

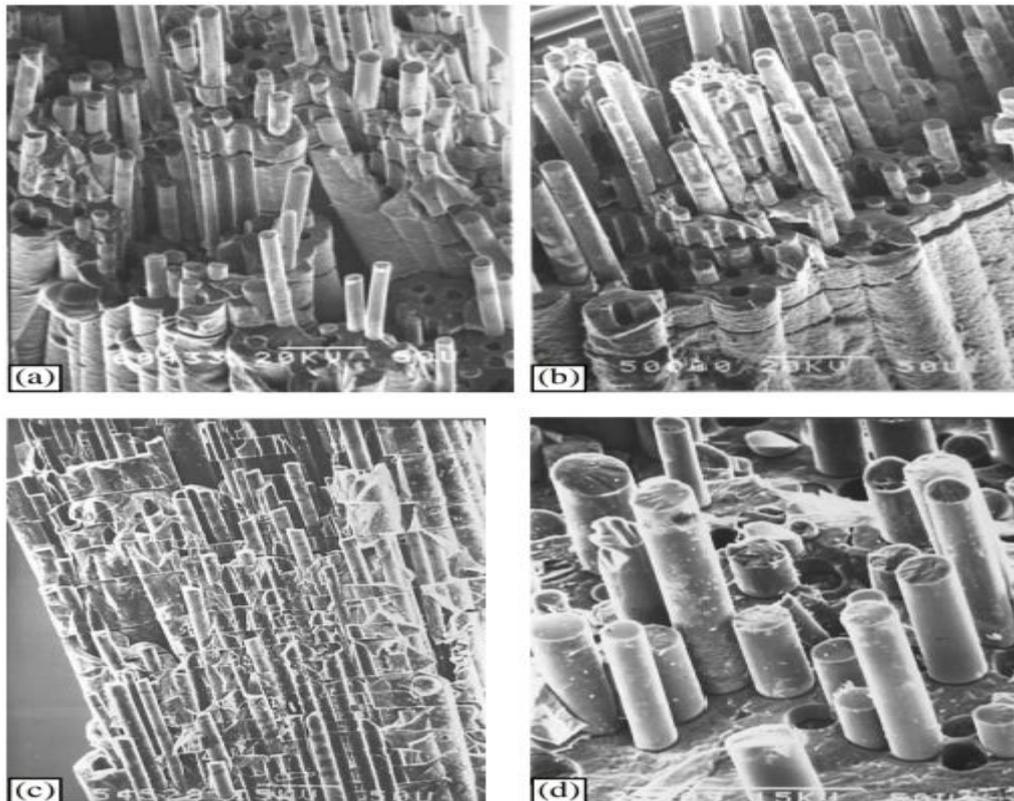


Figure 18 : Rupture quasi fragile [14]

12-2- Rupture ductile :

La (figure 19) illustre l'allure d'une surface de rupture correspondant à un mode ductile dans le cas d'un acier X100 et d'un alliage d'aluminium. On distingue dans les deux cas des cupules dont le fond est souvent occupé par une inclusion. Le faciès macroscopique est souvent rugueux, terne et chaotique.

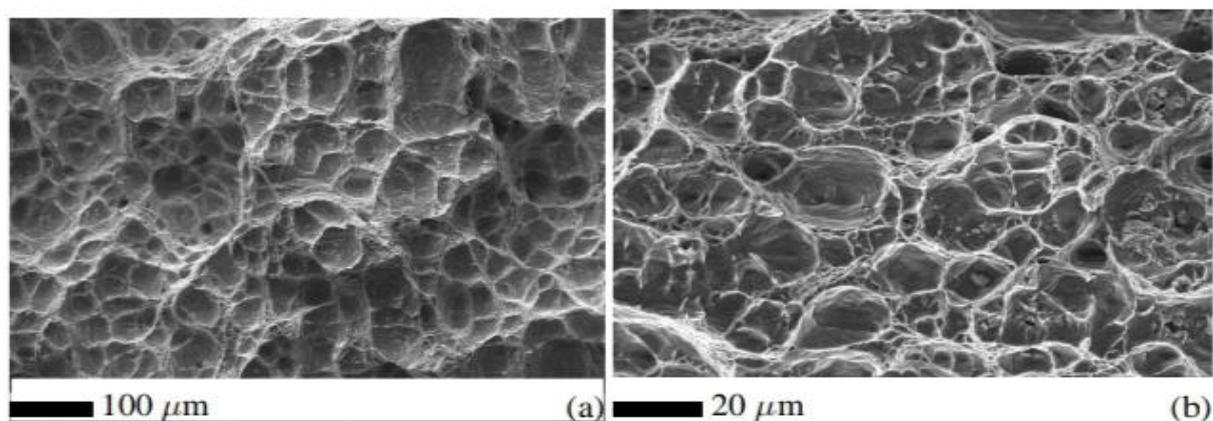


Figure 19 : Rupture ductile (a) acier X100, (b) alliage d'aluminium [14]

12-3- Rupture en fluage :

La rupture en fluage est observée dans de nombreux matériaux dès que la température est assez élevée. La figure 20 illustre les modes d'endommagement dans un acier austénitique et dans une céramique réfractaire[13].

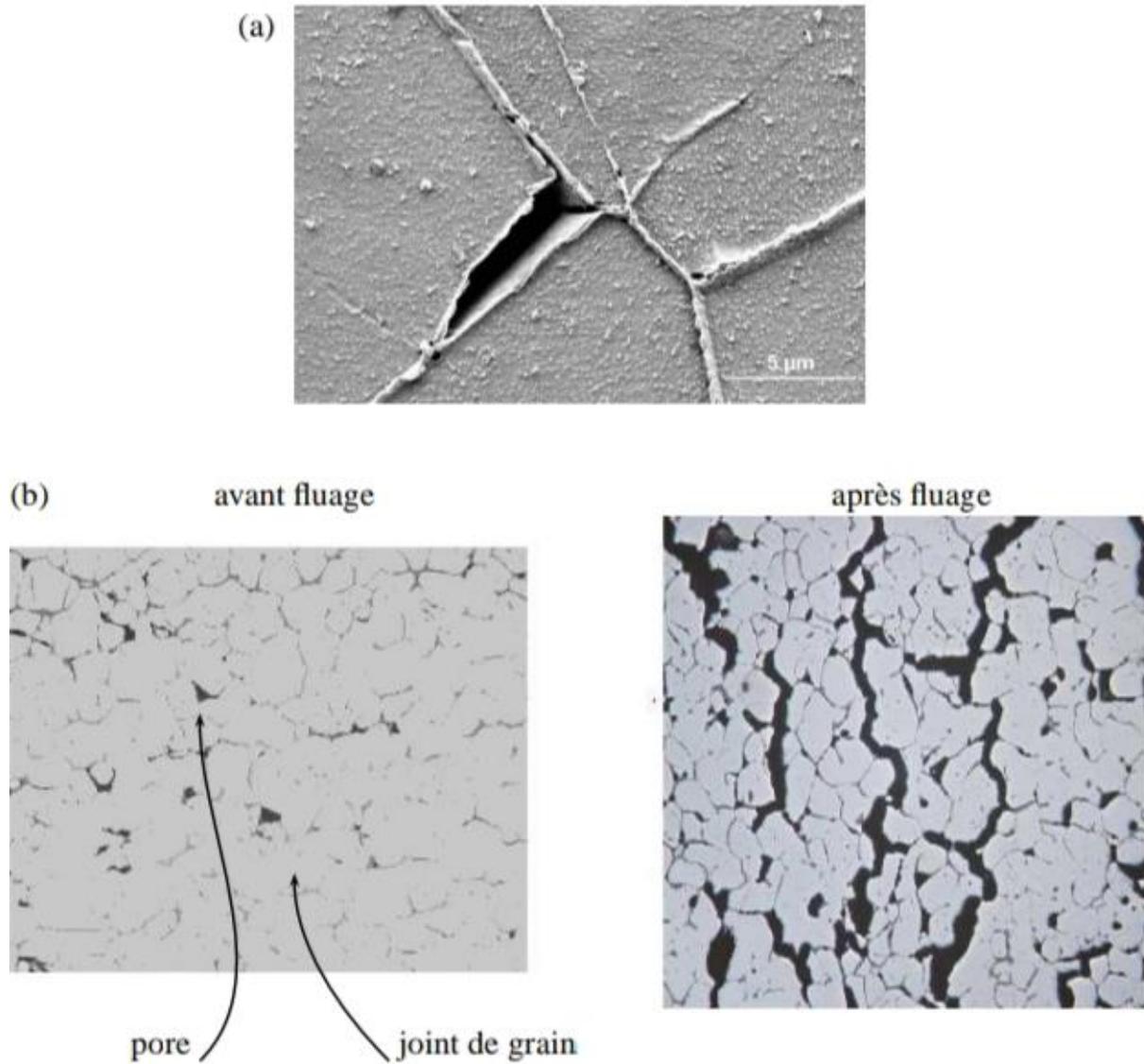


Figure 20: Endommagement en fluage (a) acier austénitique, (b) céramique réfractaire[14]

Chapitre 02

Etude expérimentale

1- Introduction :

1-1- Problématique:

Au laminoir à fil et rond (LFR) du complexe Sidérurgique d'El Hadjar et au niveau des cages de laminage, des billettes très chaudes sortant du four (900° à 1000°C) sont dirigées vers les cylindres de laminages. Avant leur introduction entre les cylindres, les billettes dont la longueur est de 13 m, sont orientées et guidées par deux **guides billettes** se situant à l'entrée de chaque cage de laminage.

Ces **guides billettes** sont conçues à partir du matériau **C28** qui fait l'objet de notre étude.

Au fil du temps, ces **guides billettes** sont mis hors d'usage suite à l'usure abrasive sévère provoquée par le contact des billettes chaudes lors de leur passage pour être introduites dans les cages de laminage.

Ainsi, pour augmenter la **résistance à l'usure de ces guides-billettes** afin de prolonger leur durée de vie, une caractérisation du matériau les composants s'avère nécessaire et c'est dans ce contexte que la présente étude est menée :

L'arrachement du métal des guides billettes se fait dans le sens du déplacement des billettes chaudes (chauffées à 900 1000°C).

1-2- Position du problème :

A partir du métal de base (acier C28) des guides-billettes, nous avons confectionné selon la norme une série d'éprouvettes afin de les tester en traction (d'abord à température ambiante puis à très haute température), en vue de déterminer le comportement mécanique de ce matériau. L'étirement de l'acier C28 constituant les guides billettes est assimilé, dans notre étude, à une **traction de ce matériau**.

2- Analyse du matériau étudié et élaboration des éprouvettes selon la norme :

2-1- Détermination de la nuance du matériau étudié:

D'après l'analyse chimique de ce matériau, obtenue par bombardement électronique d'un échantillon prélevé de notre matériau et ce, au niveau du laboratoire central de Sider El Hadjar, nous avons obtenu les résultats suivants:



Figure 21 : Echantillon du matériau étudié

Tableau 02 : Composition chimique du matériau étudié

Eléments	Pourcentages %
Carbone C	0.2837%
Manganèse Mn	0,42250%
Silicium Si	0,24235%
Phosphore P1	0,0744%
Soufre S	0,08201%

D'après la composition chimique de ce matériau, nous pouvons confirmer que c'est un acier non allié de traitement thermique désigné **C28**.

2-2- Elaboration des éprouvettes :

Selon la norme ISO 6892-2, une série d'éprouvettes destinées aux essais de traction à chaud a été fabriquée suivant le dessin de définition suivant :

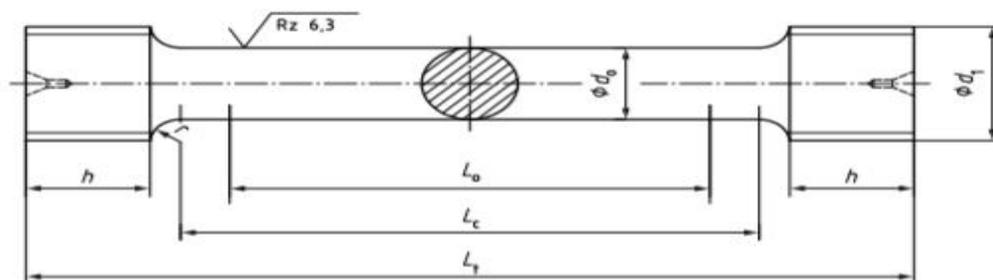


Figure 22 : Dessin de définition de l'éprouvette normalisée

- d_0 diamètre initial de la longueur calibrée
- d_1 filetage métrique ISO
- r rayon de raccordement
- h longueur des têtes d'amarrage
- L_0 longueur initiale entre repères : ($L_0=5d_0$)
- L_c longueur calibrée : ($L_c \geq L_0 + d_0$)
- L_t longueur totale de l'éprouvette

Tableau 03 : Dimensions des éprouvettes

d_0	d_1	r	h	L_0	L_c	L_t
10	M16	8	12	50	60	97



Figure 23 : Photographie de l'éprouvette normalisée

3- Bancs d'essais et conditions d'essais :

- Les essais de traction des éprouvettes confectionnées ont été réalisés sur une machine de traction assistée par un ordinateur.
- La vitesse imposée à tous les essais est de : 8mm/s
- La température d'essais étant de 25°C



Figure 24 : Machine d'essai de traction / Zwick 100KN

- Les observations microscopiques du faciès de rupture des éprouvettes rompues ont été réalisées sur un microscope optique de type Falcon Vision au laboratoire LMI.



Figure 25 : Microscope optique Falcon Vision

4- Mode opératoire des essais de traction

Le mode opératoire consiste à décrire les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un essai de traction à température ambiante. Il s'applique à toutes les éprouvettes de forme cylindrique ou prismatique.

- **Étapes du mode opératoire :**
 - Enclencher le disjoncteur sur marche (bouton noir)
 - Mettre en marche l'ordinateur et attendre l'affichage du menu suivant.
 - Choisir le programme d'essai (essai sur métaux Z1011)
 - Choisir le poste de travail (REHTEST1 ou REHTEST2)
 - Mesurer les dimensions de l'éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse ou micromètre.
 - Repérer la longueur initiale L_0 sur l'éprouvette pour déterminer l'allongement après rupture.
 - Choisir la forme de l'éprouvette sur le menu en fonction de la forme à tester (1 pour les plates, 2 pour les cylindriques).
 - Entrer les dimensions de l'éprouvette.
 - Vérifier les vitesses de mise en charge et d'essai conformément à la norme d'usage.
 - Mettre en marche l'armoire de commande (bouton blanc ON situé sur la face avant du DUPS).
 - Vérifier, sinon choisir les mordaches appropriées en fonction de la forme et dimensions de l'éprouvette à tester.
 - Réinitialiser la force et l'allongement sur menu machine.
 - Mettre en place l'éprouvette.
 - Bloquer les mordaches du haut et celle du bas et s'assurer que l'éprouvette est bien fixée, afin d'éviter un glissement.
 - Relever la température.
 - Démarrer l'essai (menu essai).

Chapitre 02 : Étude expérimentale

- Attendre la fin de l'essai et avant d'imprimer le graphique de traction s'assurer que la sécante passe exactement sur la portion rectiligne de la courbe, dans le cas contraire corriger le tracé de la sécante en agissant sur le menu prévu à cet effet (menu entrée).
- Imprimer la courbe d'essai.
- Récupérer l'éprouvette rompue.
- Mesurer l'allongement après rupture sur l'éprouvette.
- Relever les grandeurs physiques (R_e , R_m).

4-1- Courbes expérimentales de comportement mécanique des éprouvettes testées :

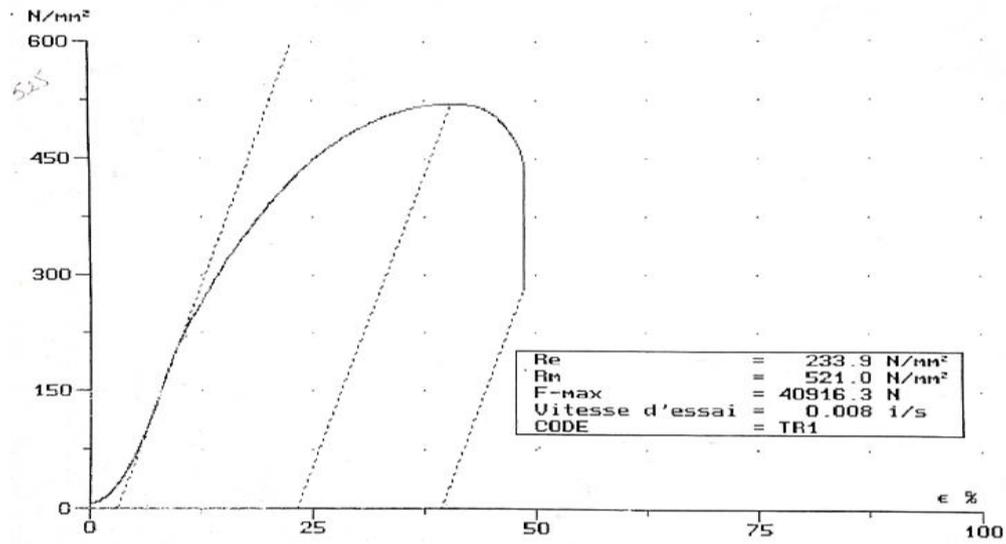


Figure 26 : Essai de traction TR1

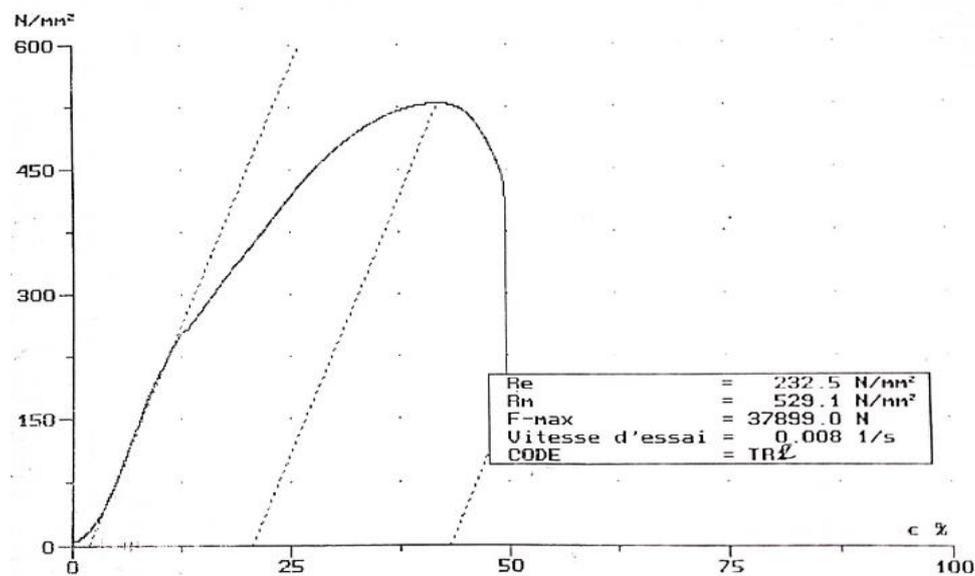


Figure 27 : Essai de traction TR2

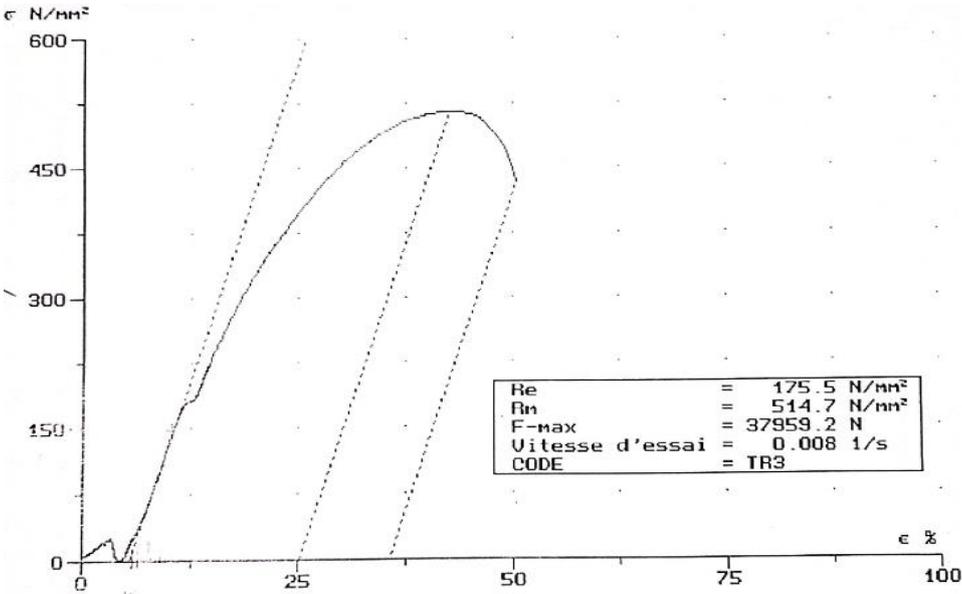


Figure 28 : Essai de traction TR3

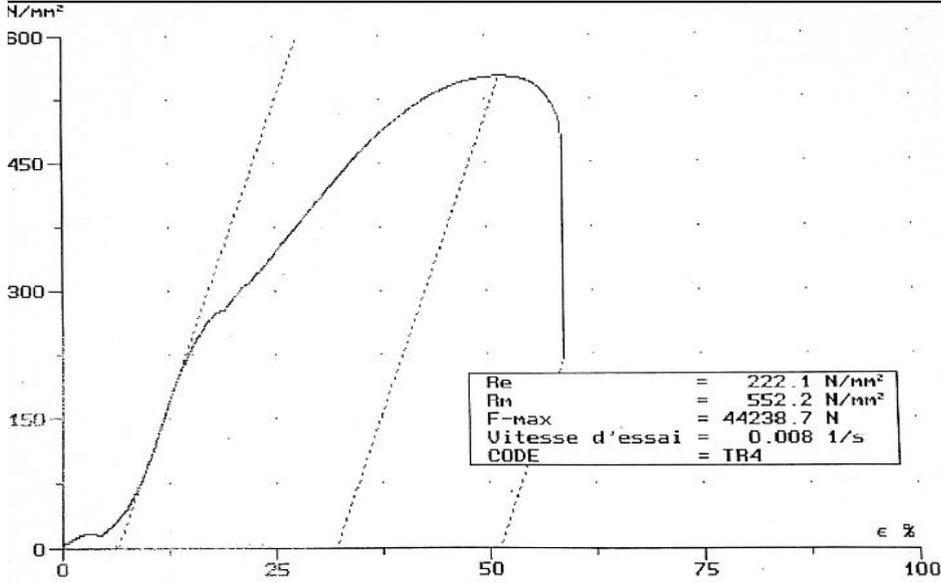


Figure 29 : Essai de traction TR4

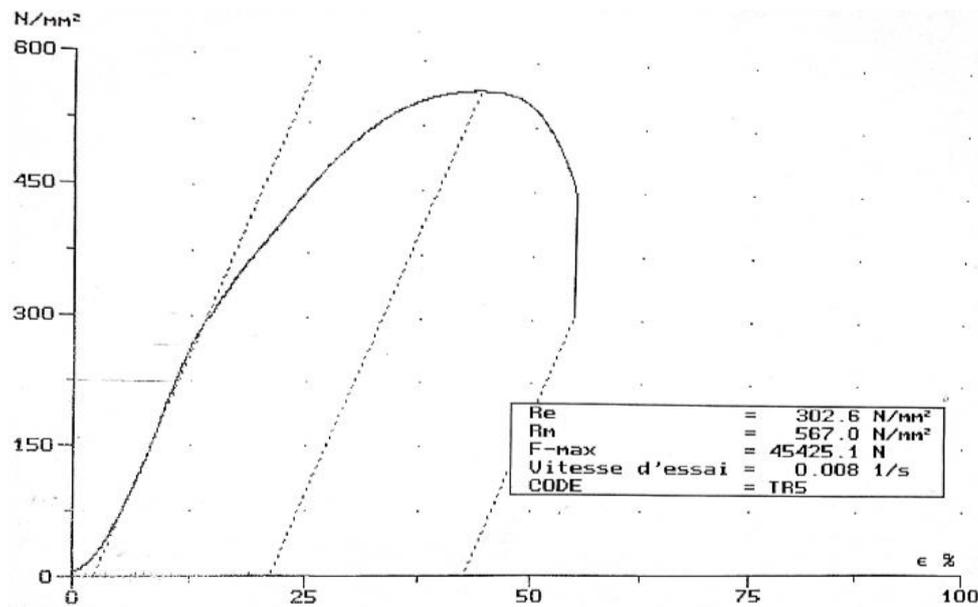


Figure 30 : Essai de traction TR5

Tableau 04 : Résultats des essais de traction

Essai	Re	Rm	F	V	T
TR1	233.9	521	40916.3	0.008	25°
TR2	232.5	529.1	37899.0	0.008	25°
TR3	175.5	514.7	37959.2	0.008	25°
TR4	222.1	552.2	44238.7	0.008	25°
TR5	302.6	567.0	45425.1	0.008	25°

4-2- Calcul du module d'élasticité E et de la contrainte à la rupture σ_r :

- Pour l'éprouvette TR1 :

- Le module de Young :

$$E_{\text{moy}} = \frac{225 - 150}{0.109 - 0.0781} = 2427.18 \text{ N/mm}^2$$

La section :

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 10^2}{4} = 78.5 \text{ mm}^2$$

- La contrainte à rupture :

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

$$\sigma_r = \frac{40916.3}{78.5} = 521.22 \text{ N/mm}^2$$

• **Pour l'éprouvette TR2 :**

- Le module de Young :

$$E_{\text{moy}} = \frac{187.5-150}{0.0937-0.08} = 2737.22 \text{ N/mm}^2$$

- La contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{37899}{78.5} = 482.79 \text{ N/mm}^2$$

• **Pour l'éprouvette TR3 :**

- Le module de Young :

$$E_{\text{moy}} = \frac{175.5-37.5}{0.125-0.0625} = 2208 \text{ N/mm}^2$$

- La contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{37959.2}{78.5} = 483.56 \text{ N/mm}^2$$

• **Pour l'éprouvette TR4 :**

- Le module de Young :

$$E_{\text{moy}} = \frac{112.5-75}{0.1129-0.095} = 2094.97 \text{ N/mm}^2$$

- La contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{44238.7}{78.5} = 563.55 \text{ N/mm}^2$$

• **Pour l'éprouvette TR5 :**

- Le module de Young :

$$E_{\text{moy}} = \frac{187.5-150}{0.0937-0.077} = 2245.50 \text{ N/mm}^2$$

- La contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{45425.1}{78.5} = 578.66 \text{ N/mm}^2$$

Tableau 05 : Modules de Young et Contraintes à la rupture des éprouvettes testées

Eprouvettes	Module de Young (N/mm ²)	Contrainte à la rupture (N/mm ²)
TR1	2427.18	521.22
TR2	2737.22	482.79
TR3	2208 .00	483.56
TR4	2094.97	563.55
TR5	2245.50	578.66

4-3- Interprétation des courbes expérimentales de comportement mécanique :

En général, les courbes de comportement des éprouvettes testées ont la même allure. Elles sont définies par trois phases :

Phase 1 : Zone linéaire, il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau.

Phase 2 : Zone non linéaire, il s'agit d'une déformation plastique irréversible du matériau.

Phase 3 : Zone non linéaire, il s'agit rupture fragile.

-La courbe représente la déformation du matériau C28. Dans cette courbe on a une ligne droite c'est la déformation élastique réversible : le matériau s'allonge quand on tire dessus et l'arrêt de la traction entraîne un retour élastique du matériau à son état initial aucune déformation définitive. La fin de cette zone marque la fin du comportement linéaire du matériau, elle a lieu pour une contrainte appelée la limite élastique R_e et la pente de cette droite permet de déterminer le module de Young E .

- A partir d'un certain allongement c'est le début de la déformation plastique irréversible : il y a déformation définitive du matériau qui ne revient plus à son état initial. Plus la contrainte augmente et plus la déformation est importante. La fin de ce domaine se situe pour une contrainte que l'on considérera comme contrainte maximale du matériau avant sa rupture (contrainte à rupture σ_r ou résistance mécanique R_m).

- Dans la dernière zone, le matériau commence à se détériorer irrémédiablement (fissures).

La rupture peut intervenir à tout moment (et sans prévenir...) Un matériau ayant une rupture reste quand même élastique. Sa longueur finale à rupture est exprimée en % de sa longueur initiale: $A\%$: allongement à rupture.

5- Endommagement du matériau étudié :

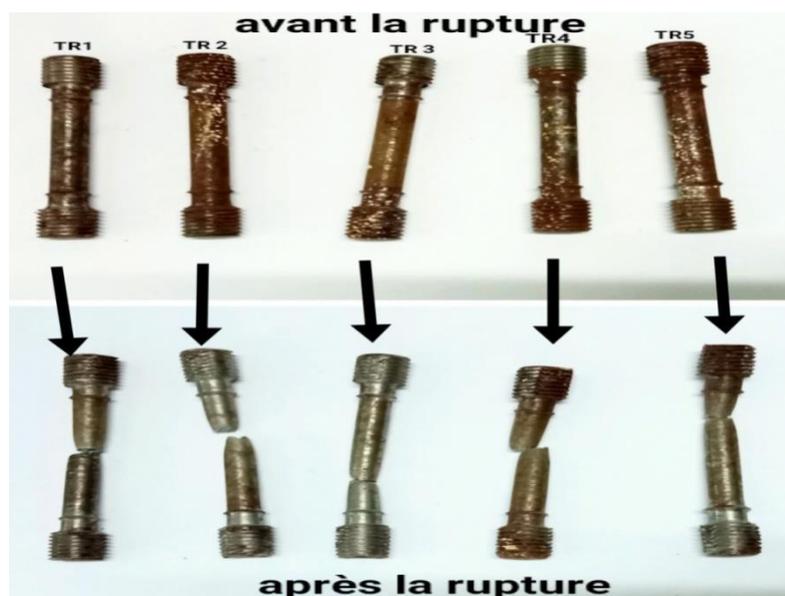


Figure 31 : Eprouvettes avant et après la rupture

- Le type d'endommagement en traction monotone :

D'après la littérature et les observations microscopiques du faciès de rupture des éprouvettes rompues, on peut déduire que le type de rupture est de nature **fragile**.

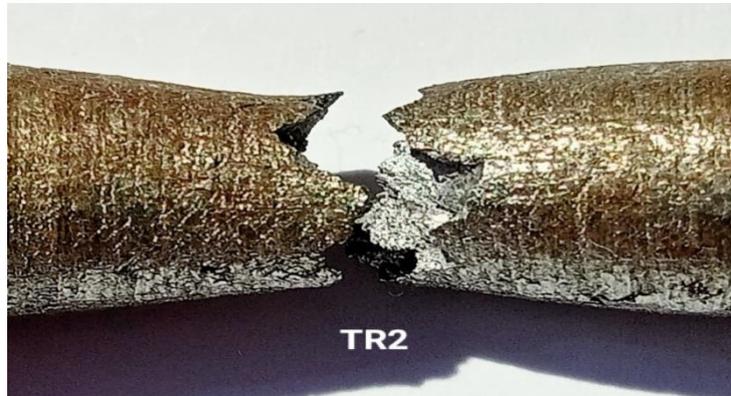


Figure 32 : Observation macroscopique de l'éprouvette TR2

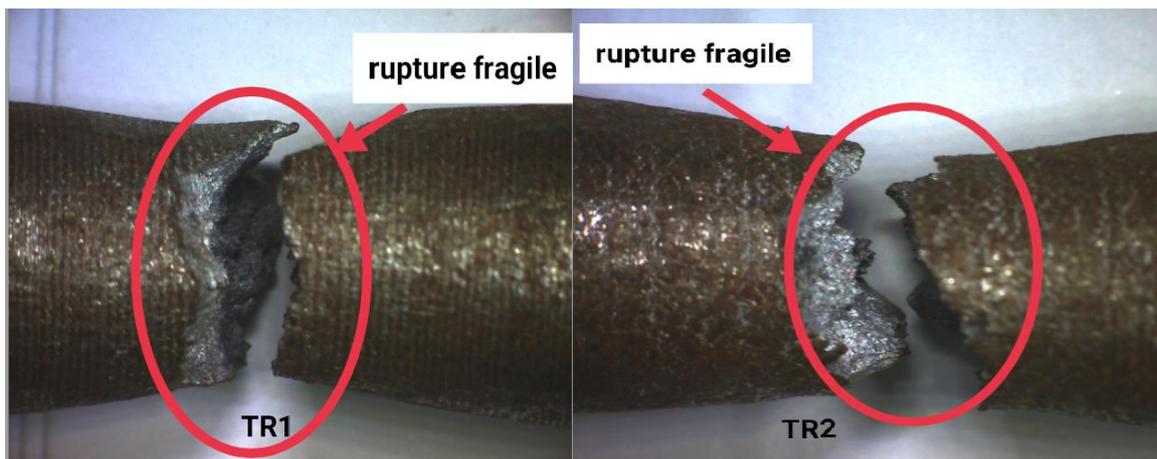


Figure 33 : Observation microscopique

- L'observation du faciès de rupture des éprouvettes, par microscope optique, a permis, comparativement à la littérature, de confirmer la **rupture fragile** de ce matériau.

Chapitre 03

Détermination numérique des champs de contraintes et des déformations

1- Introduction

Aujourd'hui, la simulation de produits est souvent réalisée par des groupes d'ingénieurs qui utilisent des outils de différents fournisseurs afin de simuler des attributs de conception variés. Le recours aux produits logiciels de plusieurs fournisseurs est source d'inefficacité et d'augmentation des coûts. SIMULIA propose une suite évolutive de produits d'analyse unifiés qui permettent à tous les utilisateurs, quels que soient leur savoir-faire en matière de simulation et le domaine qu'ils ciblent, de collaborer et de partager en toute transparence des données de simulation et des méthodes approuvées sans perte de fidélité des informations.

La suite de produits Abaqus Unified FEA offre des solutions puissantes et complètes pour répondre aux problèmes d'ingénierie courants ou complexes au sein d'un large éventail d'applications industrielles. Dans le secteur automobile, les groupes d'ingénieurs peuvent prendre en compte la totalité des charges des véhicules, les vibrations dynamiques, les systèmes intégrant plusieurs carrosseries, les impact/collisions, les éléments statiques non linéaires, le couplage thermique et le couplage acoustique-structure à l'aide de la structure de données d'un modèle commun et d'une technologie de solveurs intégrée. Les sociétés les plus performantes tirent parti d'Abaqus Unified FEA pour consolider leur processus et leurs outils, réduire les coûts et les sources d'inefficacité et obtenir un avantage concurrentiel[15].

2- Présentation du logiciel Abaqus

Abaqus est un logiciel de calcul éléments finis développé par (Dassault Système). Il se compose de trois produits : Abaqus /Standard, Abaqus/Explicite et Abaqus /CAE.

- Abaqus /Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur Abaqus/Explicite emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.
- Abaqus/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Les produits Abaqus, Abaqus/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations.

La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

Abaqus est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

Abaqus fût d'abord conçu pour analyser les comportements non- linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau[15].

3- Etapes de simulation de l'essai de traction

Chapitre 03 : Détermination numérique des champs de contraintes et des déformations

La simulation de cet essai a été faite par le logiciel de simulation par éléments finis ABAQUS. Ce logiciel est très important dans le champ des simulations pour obtenir des résultats sur les diverses variables, et pouvoir comprendre le comportement des matériaux. Pendant cette étude, on va changer les différents paramètres pour connaître l'effet de ceux-ci dans les résultats numériques obtenus.

Les étapes choisies pour l'étude sont :

3-1- Création de l'objet :

- Dans le module **Part : create** 'éprouvette'
- Choisir objet **2D deformable, Shell**. De taille approximative 200
- Choisir base feature de type Extrusion, Shape solide.

3-2- Définition des propriétés du matériau :

- Dans le module : **Property** faire appel à part '**éprouvette**' dans la barre de menu cliquez **Material, create**. Dans la fenêtre **Edit Material** nommez le matériau Acier.
- Sélectionnez General, Mass density: 7.8 E-006.
- Sélectionnez Mechanical, Elasticity, Elastic. Entre les propriétés d'élasticité du matériau, le module de Young et le coefficient de poisson respectivement 20000 et 0.3
- Entrer les propriétés plastique : stress et strain.

3-3- Définition des étapes d'analyse :

Il faut définir les étapes d'analyse à effectuer. Dans le module Step sélectionnez Dynamic Explicit et créer les steps.

3-4- Application des conditions aux limites :

Dans le module **Load** choisi Create Boundary : on définit les conditions aux limites qui s'expriment par le BC-1 relatif à un **encastrement** et le BC-2 relatif au type **déplacement /rotation**.

3-5- Maillage de l'objet

Pour analyser l'effet du maillage dans un premier temps on va changer le paramètre de la taille des éléments, qui dans le logiciel s'appelle Approximate global size (avant appelé taille maillage). Dans le module Mesh, sélectionnez Seed, Approximate global size.

3-6- Création et soumission du travail d'analyse

Dans le module **Job**, cliquer sur **create Job** et nommez le job et après lancer les calculs pour avoir les résultats

3-7- Résultats de la simulation

Dans cette étape le logiciel Abaqus termine les calculs et affiche les résultats[15].

4- Simulation numérique par Abaqus de l'éprouvette d'essai :

La simulation numérique est réalisée pour l'éprouvette définie géométriquement sous une charge moyenne $F = 40000 \text{ N}$.

Pour simuler les conditions d'essai en traction, le spécimen est soumis à une charge axiale (suivant y) croissante.

4-1- Conditions aux limites imposées à l'éprouvette:

- Au niveau des mors :
 - mors inférieur bloqué.
 - mors supérieur libre (selon axe y).
- La partie calibrée est libérée.
- La charge imposée est variable (de F_0 à F_{\max}).

4-2- Modèle géométrique de l'éprouvette d'essai:

A l'aide du logiciel Abaqus, on a pu obtenir la configuration suivante :

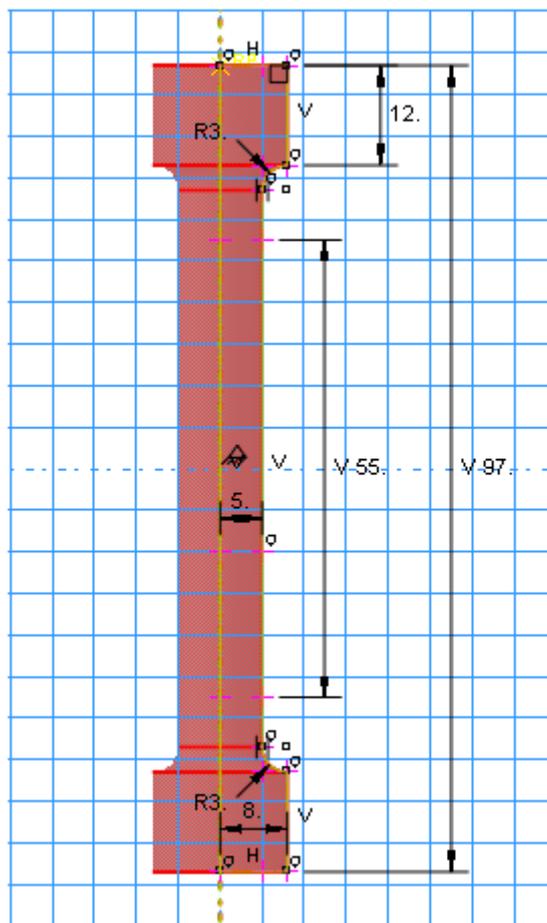


Figure 34 : Modèle géométrique

Chapitre 03 : Détermination numérique des champs de contraintes et des déformations

Dans le module **Part**, nous avons créé les objets géométriques nécessaires à la définition géométrique de notre problème en le dessinant dans **Abaqus /CAE**.

4-3- Maillage de l'éprouvette d'essai :

La discrétisation des éprouvettes est effectuée par des éléments de type 'hexagonal' C3D8R. Le maillage est acquis pour **4150** éléments.

La signification de C3D8R est la suivante :

- C : Hexagonale.
- 3D : Troisième dimension.
- 8 : Neuds
- R : Rédaction

L'éprouvette d'essai est discrétisée en 4150 éléments dans le cas de la traction :

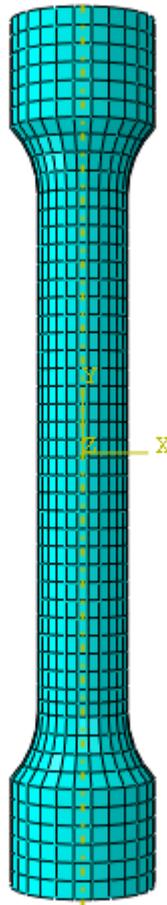


Figure 35 : Maillage avec 4150 éléments « hexagonal C3D8R »

4-4- Champs des déformations de l'éprouvette d'essai :

L'application de la charge en traction provoque la déformation de l'éprouvette selon les allures montrées sur la (figure 36) :

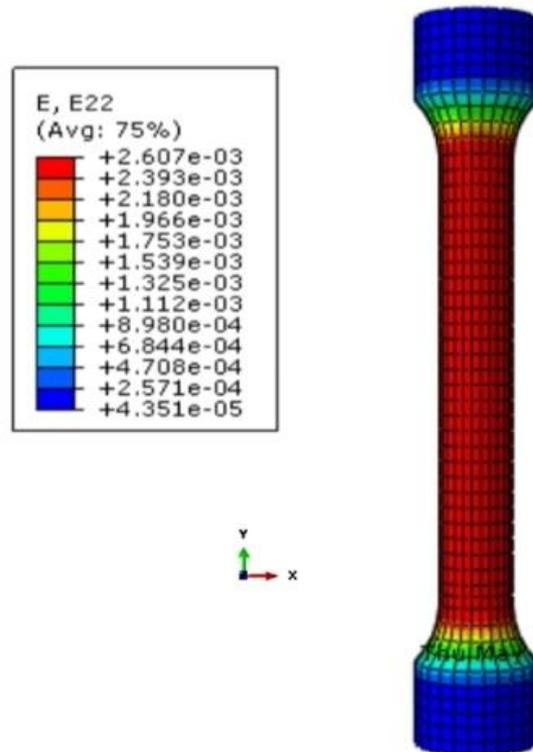


Figure 36 : Champs de déformations de l'éprouvette selon l'axe y

Les zones calibrées montrent la répartition des champs de déplacements suivant le diamètre et la longueur de l'éprouvette. **E** tel que c'est représenté par le logiciel veut dire dans ce cas précis **déformation**

4-5- Champs des contraintes normales de l'éprouvette d'essai :

Les champs de contraintes normales sont représentés sur la (figure 37) suivante :

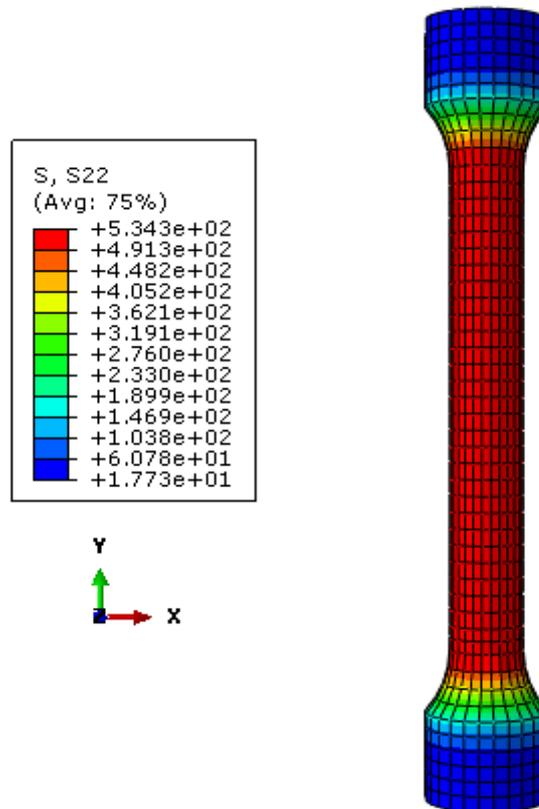


Figure 37 : Champs de contraintes normales

Le choix de représenter ces contraintes est dû au fait qu'elles sont les plus proches de celles obtenues expérimentalement. Les contraintes normales selon l'axe (y) sont maximales.

5- Interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique :

Les résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus par simulation numérique sur une éprouvette moyenne sont les suivants :

- | | |
|---|--|
| • $\sigma_{r \text{ expérimentale}} = 525,9 \text{ N/mm}^2$ | $\sigma_{\text{numérique}} = 534 \text{ N/mm}^2$ |
| • $\varepsilon_{\text{expérimentale}} = 0,278$ | $\varepsilon_{\text{numérique}} = 0.206$ |
| • $E_{\text{expérimental}} = 1891,92 \text{ N/mm}^2$ | $E_{\text{numérique}} = 2048,33 \text{ N/mm}^2$ |

Ainsi nous pouvons confirmer la bonne concordance entre les deux résultats :

- La valeur de la contrainte à la rupture expérimentale se rapproche beaucoup de la valeur de la contrainte à la rupture numérique.
- La valeur du module d'élasticité expérimental se rapproche beaucoup de la valeur du module d'élasticité numérique.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

En conclusion générale, nous pouvons déduire de cette étude ce qui suit :

- Dans la partie recherche bibliographique, nous nous sommes intéressés à la littérature inhérente aux matériaux métalliques et particulièrement aux différents essais mécaniques auxquels ils peuvent être soumis. Les essais mécaniques relatifs à la traction monotone des aciers sont mis en exergue dans le but de servir comme support à la partie expérimentale.
- Les essais expérimentaux de traction menés, dans les mêmes conditions, sur des éprouvettes normalisées, confectionnées à partir du matériau de base des guides-billetes (acier C28), ont donné des courbes de comportement expérimental élastoplastique dont les allures se ressemblent et montrant trois zones de déformations :
 - Allure linéaire : il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau.
 - Allure non linéaire : il s'agit d'une déformation plastique irréversible du matériau
 - Allure non linéaire : il s'agit de la striction avant la rupture.

Le calcul des modules d'élasticité expérimentaux des éprouvettes testées a fait ressortir des différences dans leurs valeurs : ceci est dû à la non homogénéité du matériau à partir duquel les éprouvettes ont été découpées et à l'amarrage de celles-ci au niveau du dispositif de fixation.

- L'observation du faciès de rupture des éprouvettes, par microscope optique, a permis, comparativement à la littérature, de confirmer la rupture fragile de ce matériau.

- Dans la simulation numérique, en appliquant le code calcul Abaqus, on a pu déterminer les champs de contraintes et de déformations sur un modèle géométrique identique aux éprouvettes réelles en appliquant une charge moyenne de 40.000 N. Le calcul qui s'en est suivi a permis de vérifier les résultats expérimentaux pour E et pour $\bar{\sigma}_r$:
 - La valeur de la contrainte à la rupture expérimentale se rapproche beaucoup de la valeur de la contrainte à la rupture numérique.
 - La valeur du module d'élasticité expérimental se rapproche beaucoup de la valeur du module d'élasticité numérique.

Références Bibliographiques

Référence bibliographique :

- [1] Taamallah Ouahiba, Effet de traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et la ténacité d'un Acier, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba 2012, Afnor, Produits sidérurgiques, Aciers pour construction, Recueil de normes français, 1988.
- [2] Source internet.
- [3] <https://material-properties.org/fr/que-sont-les-métaux-definition/> .
- [4] M.Bengersallah, cours matériaux et propriétés mécaniques, Ouvrage édition El Djazair Mars 2015.
- [5] Catalogue Stellram, Tableau des références matières.
- [6] Les essais PDF, <http://joho.monsite.orange.fr/> .
- [7] Comportement mécanique des matériaux métalliques, cours destiné aux étudiants inscrits en Master 1 GM, Université Batna 2, Faculté de technologie, département de mécanique, Pr.A.Derardja.
- [8] BERNARD DUFOUR, caractéristique- matériau Adobe Acrobat document.
- [9] *Dominique François* : Essai de dureté, Technique de l'ingénieur M4160-1.
- [10] Catalogue gunt HAMBURG, Essai des matériaux page 317-325
http://www.gunt.de/images/download/mechanical_testing_methods_frech.pdf
- [11] Cours essai de traction PDF –Univ Biskra.dz
- [12] S.Djari, essai de traction, Laboratoire résistances des matériaux, Licence 2^{ème} année Filière : aéronautique/ génie mécanique.
- [13] NGUIBERT-Cap1-caractérisation d'un matériau 2012 PPT Adobe Acrobat Document.
- [14] J.BESSON, Matériaux pour l'ingénieur, Chapitre XXIII : endommagement et rupture.
- [15] Deghboudj Samir, polycopié de travaux pratiques, logiciels de simulation numérique en mécanique, 2019.