

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Brunissage de l'acier N80 et Galetage de l'Al2024 :
Influence sur la ténacité**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MECANIQUE DES MATERIAUX

PRESENTE PAR : AOULMI KHAOULA

Directeur du mémoire : Mr. H. HAMADACHE MCA

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT: LAGRED .H MCA UNIV. ANNABA

EXAMINATEURS : BOUSSAID. O MCA UNIV. ANNABA

MENAIL. Y MCB UNIV. ANNABA

Année: 2013/2014

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I.

Figure1. Situation géographique du complexe

Figure 2 : Vue générale de l'AMPTA

Figure.3 : organigramme de L'AMPTA

Figure4 : Organigramme de fabrication

Figure 5 : Principaux postes de travail de fabrication des tubes

CHAPITRE II.

Figure 1 :un pétrolier de ravitaillement de la Seconde Guerre Mondiale (S.S. Schenectady qui se brisa en 1941).

Figure 2 : Rupture d'un autopont lors d'un tremblement de terre.

Figure 3 : la différence entre rupture fragile et ductile

Figure 4 : Illustration des trois modes de propagation d'une fissure

Figure 5 : Courbe type de l'essai de traction

Figure 6: Machine d'essai de résilience « Mouton de Charpy »

Figure 7 : Différents types de galetage a) Galetage de surface ; b) Galetage dimensionnel, c) Galetage de renforcement

Figure 8 : des fuselages complets d'avion.

Figure 9 : Essai du fatigue jusqu'à la rupture

Figure 10 : courbe S.N (Stresses – Number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

CHAPITRE III.

Figure 1 : Obtention des éprouvettes a) la vérole, b) la barrette

Figure2 : Fraisage des barrettes

Figure 3: Eprouvette de traction : a) Géométrie, b) Photo

Figure4 : Eprouvettes de résilience : a) Géométrie, b) Photo

Figure 5 : la machine de traction.

Figure 6 : mouton pendule de Charpy.

Figure7 : La machine de dureté

Figure 8 : Schéma du dispositif du brunissage

Figure 9 : la fraiseuse

CHAPITRE IV.

Figure 1 : Composition chimique et analyse au MEB des constituants présents dans la matrice de l'alliage Al 2024 T351

Table des matières

CHAPITRE I. LE COMPLEXE ARCELOR MITAL

INTRODUCTION.....	1
I.1. PRESENTATION DU COMPLEXE ARCELOR MITTAL ANNABA.....	1
I.2. PROCESSUS DE PRODUCTION.....	1
I.3. L'UNITE TSS OU AMPTA.....	2
I.3.1. Organisation structurelle de l'AMP TA.....	3
I.3.2. les principaux produits de cette unité.....	5
I.3.3.commercialisation du produit fini.....	5
I.3.4. les ateliers de production.....	5
I.3.5. procédure de fabrication des tubes.....	5
I.4.LABORATOIR DES ESSAIS MECANIQUE.....	8
CONCLUSION.....	8

CHAPITRE II. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1.HISTORIQUE DU L'ALLIAGE DE L'ALUMINIUM.....	9
II.2.OBTENTION DE L'ALUMINIUM.....	9
II.2.1. la bauxite.....	9
II.2.2. l'alumine.....	9
II.2.3.l'aluminium.....	9
II.3.PRINCIPAL PROPRIETE.....	9
II.4.L'ALLIAGE D'ALUMINIUM Al 2024.....	10
II.4.1. Avantage et inconvénients du l'alliage 2024	10
II.4.2. Domaine d'utilisation du l'alliage 2024.....	10
II.4.3. La ténacité de l'aluminium 2024.....	10
II.5NOTION DE MECANIQUE DE RUPTURE.....	11

II.5.1. Les types de rupture.....	12
II.5.2.Modes de propagation d'une fissure.....	14
II.5.3.Détermination des facteurs d'intensité de contrainte.....	14
II.6.LA TENACITE.....	15
II.6.1.Généralité.....	15
II.6.2.Mésure de ténacité.....	15
II.6.2.1.Essai de traction.....	15
II.6.2.2.Essai de résilience.....	16
II.6.2.2.1.But de l'essai.....	16
II.6.2.2.2.Principe de l'essai.....	16
II.6.2.2.3.Machine de l'essai.....	17
II.6.2.3. la mécanique de la rupture.....	18
II.7. TRAITEMENTS MECANQUES DE SURFACE.....	19
II.7.1.Généralités.....	19
II.7.2. GALETAGE.....	19
II.7.2.1. Généralités.....	19
II.7.2.2. But du galetage.....	20
II.7.2.3. Types du galetage.....	20
II.7.2.4.Effets du galetage.....	22
II.7.2.5. L'état de surface.....	22
II.8. FATIGUE.....	23
II.8.1.Phénomène de fatigue.....	23
II.8.2. Définition.....	23
II.8.3.Types d'essais de fatigue.....	23
II.8.4. Limite d'endurance.....	26

CHAPITRE III. BRUNISSAGE DE L'ACIER N80

III.1. LE MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	27
III.1.1. Le matériau.....	27
III.1.2 Composition chimique.....	27
III.1.3 Caractéristique mécaniques.....	27
III.1.4. Les éprouvettes.....	27
III.1.5. Déroulement des essais.....	29
III.1.5.1. Essais de traction.....	29
III.1.5.2. Essai de résilience.....	30
III.1.5.3. Essai de dureté.....	31
III.1.6. Le brunissage.....	31
III.1.7. Déroulement des essais.....	32
III.1.7.1. Résultats d'essai de traction.....	32
III.1.7.2. Résultat d'essai de résilience.....	33
III.1.7.3. Résultat d'essai de dureté.....	34

CHAPITRE IV. GALETAGE DE L'ALUMINIUM AI 2024	
IV.1. LEMATERIAU.....	35
IV.1.1.composition chimique.....	35
IV.1.2. Les caractéristiques mécaniques.....	36
IV.2. EPROUVETTES.....	37
IV.2.1. Prélèvement.....	37
IV.2.2. Géométrie et usinage des éprouvettes.....	37
IV.3. DISPOSITIF D'ESSAI ET INSTRUMENTATION.....	39
IV.4 .TABLEAU RECAPITULATIFS DES ESSAIS DE FATIGUE.....	40
IV.5. DETERMINATION DE FIC (FORMULATION DE NEWMAN-RAJU).....	42
IV.5.1. Défaut de surface semi-elliptique.....	42
IV.5.2. Défaut de coin en quart d'ellipse.....	44
IV.6. DEROULEMENT DE L4ESSAI.....	46
CONCLUSION GENERALE	

INTRODUCTION

Les causes des dégradations en services des pièces ou des structures sont multiples mais d'importance très diverses ainsi :

- Soumises à des efforts ou des déformations excessifs, une pièce se déforme de façon irréversible (anormale) et finit par se rompre : c'est donc que la pièce est mal conçue ou que les efforts extérieurs dépassent leurs valeurs admissibles.
- Si les efforts sont cycliques, il y aura un phénomène de fatigue engendrant une rupture brutale.
- Opérant dans un milieu agressif, la pièce se ruine par corrosion du métal.
- En contact, sous l'effet des frottements, les pièces se dégradent par suite d'usure.

Malgré le développement de matériaux à outil super durs les procédés d'usinage conventionnels tels que : le tournage ou le fraisage usuellement intégrés dans le processus de fabrication des pièces produisent des surfaces avec des irrégularités inhérentes ; on recourt alors aux procédés de super finition comme la rectification, le rodage ou le honing pour finir les surfaces. Certains de ces procédés de part leurs coûts élevés sont parfois insuffisants pour améliorer les propriétés physiques du matériau.

Dans plusieurs domaines de l'industrie mécanique, les meilleurs résultats pour les pièces à risque d'endommagement par fatigue sont obtenus en effectuant un traitement qui allie un bel état de surface à un durcissement superficiel associé à une précontrainte de compression. Ces résultats sont souvent retrouvés au moyen des traitements mécaniques de surface (TMS) tels que le brunissage ou le galetage. Ces traitements constituent des procédés de mise en œuvre à froid par déformation élasto-plastique des couches superficielles.

Les caractéristiques de surfaces sont d'une importance particulière pour les ateliers d'usinage de l'unité Metal Steel de Annaba (Algérie) qui cherche à optimiser la gamme de mise en œuvre N80 tout en lui conférant des propriétés mécaniques plus meilleures.

Ainsi, une première partie de ce travail porte sur l'effet du brunissage les principales propriétés de cette nuance d'acier telles que la résistance à la traction, la résilience ou la dureté. Il serait principalement question de juger à partir des corrélations empiriques la ténacité du matériau que le brunissage lui confère.

Une deuxième partie de ce travail est dédié à l'endommagement par fatigue d' l'alliage d'aluminium Al 2024. Ce phénomène étant le plus répandu et le plus mystérieux qui préoccupe les industriels de l'aéronautique. C'est en fait dès 1850 qu'a été reconnu le fait qu'un matériau sujet à des contraintes cycliques pouvait rompre à un niveau de sollicitation beaucoup plus faible que sa résistance à la traction (voir sa limite élastique). Dès lors, des études ont été entreprises afin de comprendre et de prévenir de telles ruptures [travaux de WÖHLER en 1958 et de GRIFFITH en 1920].

Ce souci est partagé, en particulier, par l'aérospatiale pour des pièces de structures aéronautiques dont on cherche toujours à améliorer leurs durées de vie lors de la fabrication.

Pour une meilleure performance, les structures aéronautiques sont généralement conçues à partir d'un matériau de faible poids avec de hautes caractéristiques mécaniques qu'on espère même les conserver sous des températures élevées. A ce titre, l'alliage industriel Al 2024T351 fait notamment partie des métaux retenus par l'industrie aéronautiques et a motivé notre étude.

Par ailleurs, le processus de production des éléments de structures aéronautiques fait appel à des procédés modernes de mise en œuvre du matériau impliquant du formage tel que le galetage qui modifie positivement les propriétés mécaniques de base du matériau. Cependant, certaines contraintes techniques tels que : les problèmes de bords, la présence de trous ou tout simplement l'incidence d'autres traitements de surface telle que l'oxydation anodique chromique associée au traitement de galetage, font que le galetage n'affecte pas la totalité des éléments de structures. Ces conditions d'application du galetage (partiel) rendent le problème de plus en plus complexe pour étudier l'influence du procédé sur la tenue en fatigue.

Le travail consiste à quantifier l'incidence du galetage (partiel) sur la tenue en fatigue de l'alliage d'Al2024-T351. Les essais sont effectués sur des éprouvettes représentatives d'éléments de structures ayant subi des conditions de galetage bien définies.

Une seconde étape portera sur l'influence des paramètres de galetages sur le facteur d'intensité des contraintes en 2D dans une géométrie 3D et donc quantifier la ténacité de cet alliage.

INTRODUCTION :

Notre cursus pédagogique est sanctionné par un stage pratique durant le semestre 4, suite aux directives du département de génie mécanique, j'ai été affectée à l'unité AMPTA du complexe Arcelor Mittal. Annaba, ainsi ce 1^{er} chapitre est dédié consiste à donner un aperçu sur ce lieu de stage.

I.1. PRESENTATION DU COMPLEXE ARCELOR MITTAL ANNABA

Créé le 03 Septembre 1964 par le décret N° 64276 et approuvant les statuts de la société nationale de Sidérurgie, il est situé à 15 Km au Sud-est du chef-lieu de la Wilaya de Annaba et occupe une superficie de 800 ha (Fig. 1).

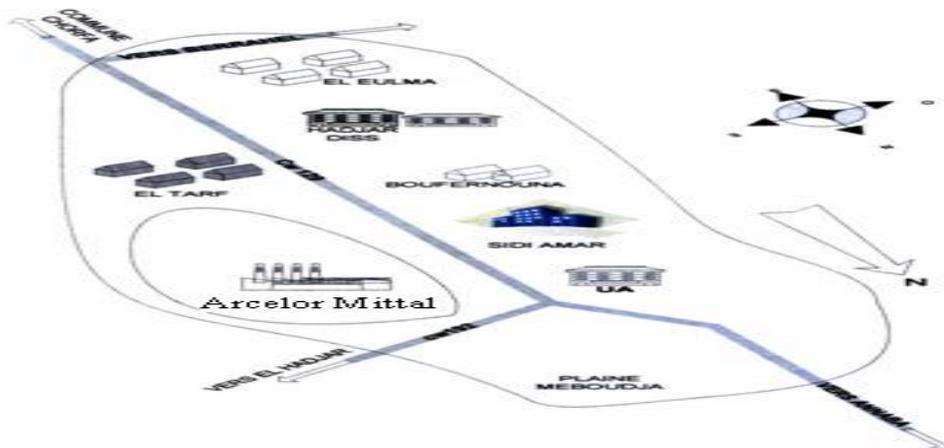


Figure1. Situation géographique du complexe

En 1993, surgissent alors des plans de restructuration de tout le complexe et plus particulièrement de la filiale TSS en vue d'un régime de partenariat avec des organismes étrangers.

En octobre 2001, suite à un certain problème, l'état a fait appel au Partenariat et le complexe est devenu une société par actions appelée ISPAT ANNABA.

C'est dans cette optique qu'une grande opération de recensement des problèmes a été entamée. De cette étude ressortent plusieurs points cruciaux ; parmi lesquels on trouve "le processus de perçage".

I.2. PROCESSUS DE PRODUCTION

Le complexe Sidérurgique d'El-Hadjar reçoit la matière première de la mine d'El-OuENZA par voie ferroviaire sur une distance de 150 Km.

Le minerai arrivant au complexe est déchargé, stocké, ensuite traité pour devenir une pâte que nous appelons aggloméré directement acheminé vers les hauts fourneaux (HF) pour fusion et donc obtention d'une fonte liquide.

Cette fonte liquide produite est soit solidifiée en gueuses de fonte brute, soit transformée en acier au niveau Aciérie à oxygène à l'aide des convertisseurs type (Système LD).

L'acier obtenu est coulé sous forme de brames d'une longueur allant jusqu'à 600 mm. Ces brames sont destinées à l'atelier de laminage à chaud pour obtention des bobines de tôles fortes. Les bobines de tôles ainsi produites sont destinées soit à l'atelier Tuberie (TUS) pour l'élaboration des tubes nécessaires aux hydrocarbures (Pipe line et gazoduc) ou encore élaborées au niveau du laminoir à froid (LAF) pour la production des tôles galvanisées, étamées et autres.

Il est à noter qu'il existe encore une deuxième Aciérie à oxygène (ACOII) identique à la première (ACO I) mais produisant des billettes (et non des brames) qui sont destinées au laminoir à fil et rond à béton (LFR).

Enfin, une troisième Aciérie électrique (ACE) équipée d'un four à arc produit des lingots d'acier à partir de ferrailles récupérées et fusionnées.

Les lingots d'acier ainsi produits sont transformés en tubes sans soudure à la TSS.

I.3. L'UNITE TSS OU AMPTA

Arcelor Mittal pipes & tubes Alegria (L'AMPTA) implantée sur le site du complexe Arcelor-Mittal ANNABA (Fig. 2), elle a pour mission principale la production des tubes sans soudure destinés principalement à l'industrie du pétrole et du gaz, son démarrage a eu lieu en 1974.

Le site de la Tuberie sans soudure a une superficie de 31.5 ha. Les surfaces couvertes sont de 81 300 m² dont :

- Ateliers de productions : 78 000 m².
- Blocs socio administratifs : 3 300 m².
- La surface des routes, parking et aires de stockage sont de : 233 700 m².



Figure 2 : Vue générale de la TSS

I.3.1. Organisation structurelle de la TSS

Le complexe est organiquement composé de plusieurs filiales parmi lesquelles on trouve la filiale Tuberie sans soudure (TSS). Cette dernière a pour tâches de transformer les lingots fournis par une aciérie électrique locale en tubes de différents diamètres.

Du point de vue technique, la filiale AMPTA rencontre d'immenses problèmes étant donné l'âge des équipements et de la technologie utilisée (datant des années 60) ; ces problèmes se répercutent directement sur les coûts de production qui sont relativement élevés par rapport au marché international.

L'AMPTA est structurée en tête par une direction générale, elle est composée de quatre directions, trois départements et plusieurs services, La structure de L'AMPTA peut se schématiser selon l'organigramme suivant (fig : 3):

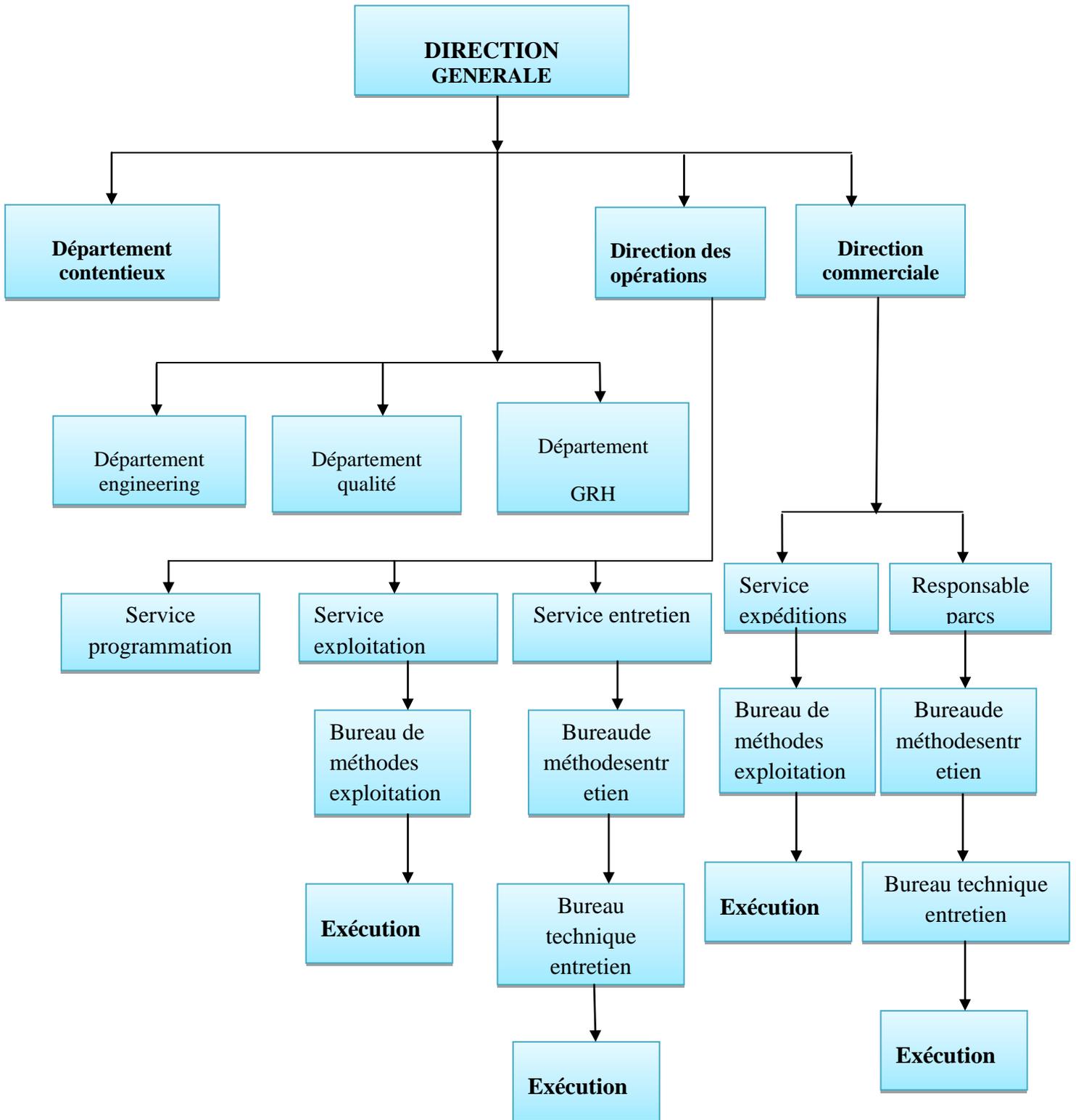


Figure.3 : organigramme de L'AMPTA

I.3.2. les principaux produits de cette unité

Les produits finis ou semi finis de cette unité sont principalement axés sur :

- Les tubes traités (casing) pour le coffrage des puits de pétrole.
- Les tubes tubings pour la production.
- Les Tubes line-pipe pour le transport des hydrocarbures liquide et gazeux.
- Les Tubes pour usage hydraulique.

I.3.3.commercialisation du produit fini

La vocation principale de cette unité est en premier lieu de satisfaire les besoins essentiels des entreprises nationales. Les principaux clients sont :

- SONATRACH
- SONELGAZ
- NAFTAL
- ALTUMET
- KHANAGAZ.

I.3.4. les ateliers de production

-LAT : Le laminoir à tubes qui permet la fabrication des tubes avec un large éventail des diamètres et différentes épaisseurs.

-PAT : Le parachèvement à Tubes spécialisé dans le traitement thermique des aciers et dans le filetage et la finition des extrémités des tubes et manchons.

-Manchons : la fabrication de manchon.

I.3.5. procédure de fabrication des tubes

La gamme de fabrication des tubes sans soudure se fait à partir des lingots qui viennent de l'aciérie.

Les différentes phases de fabrication se font selon l'organigramme de la (fig : 4). Les principaux postes de travail sont schématisés par la (fig 5).

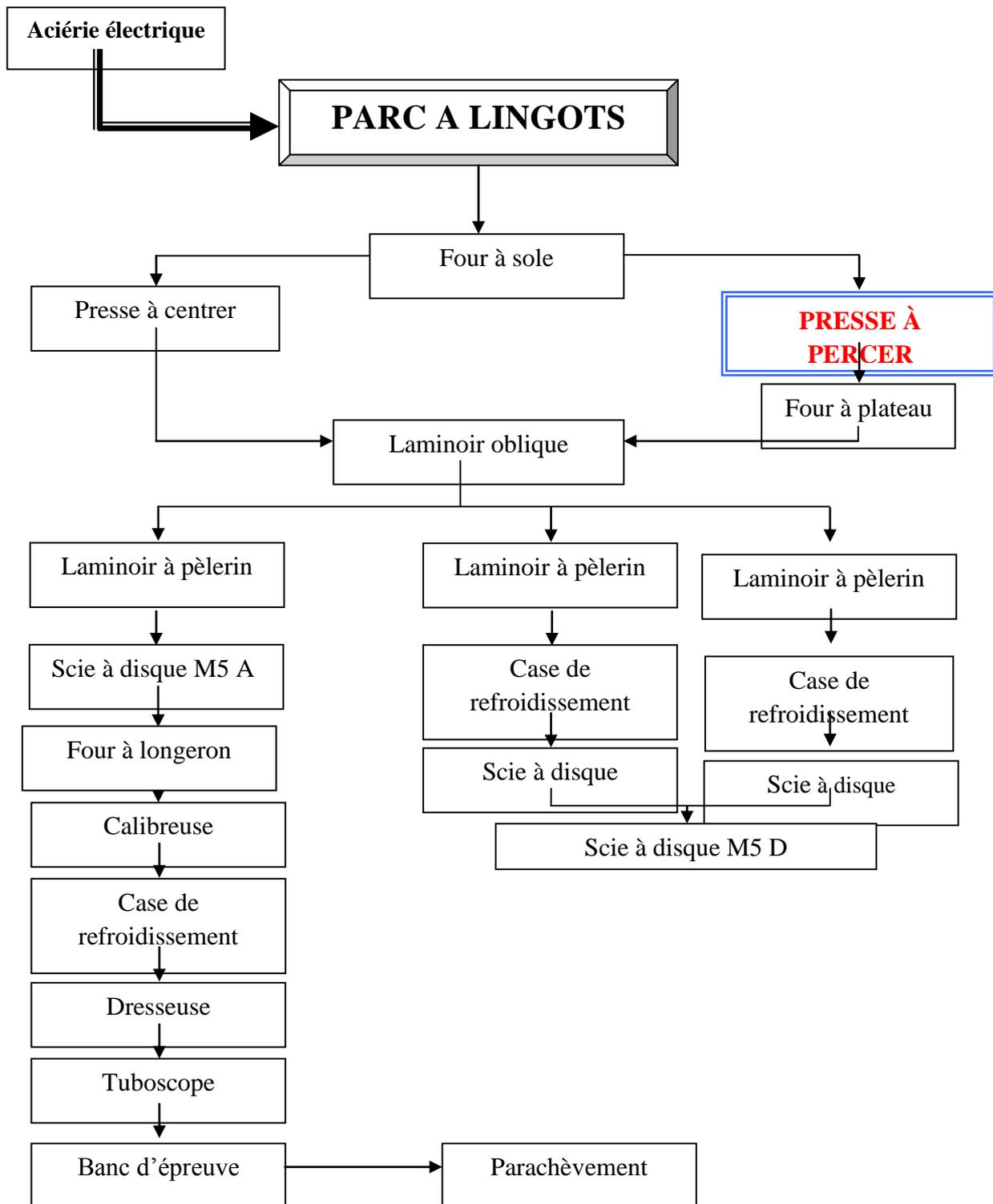


Figure4 : Organigramme de fabrication

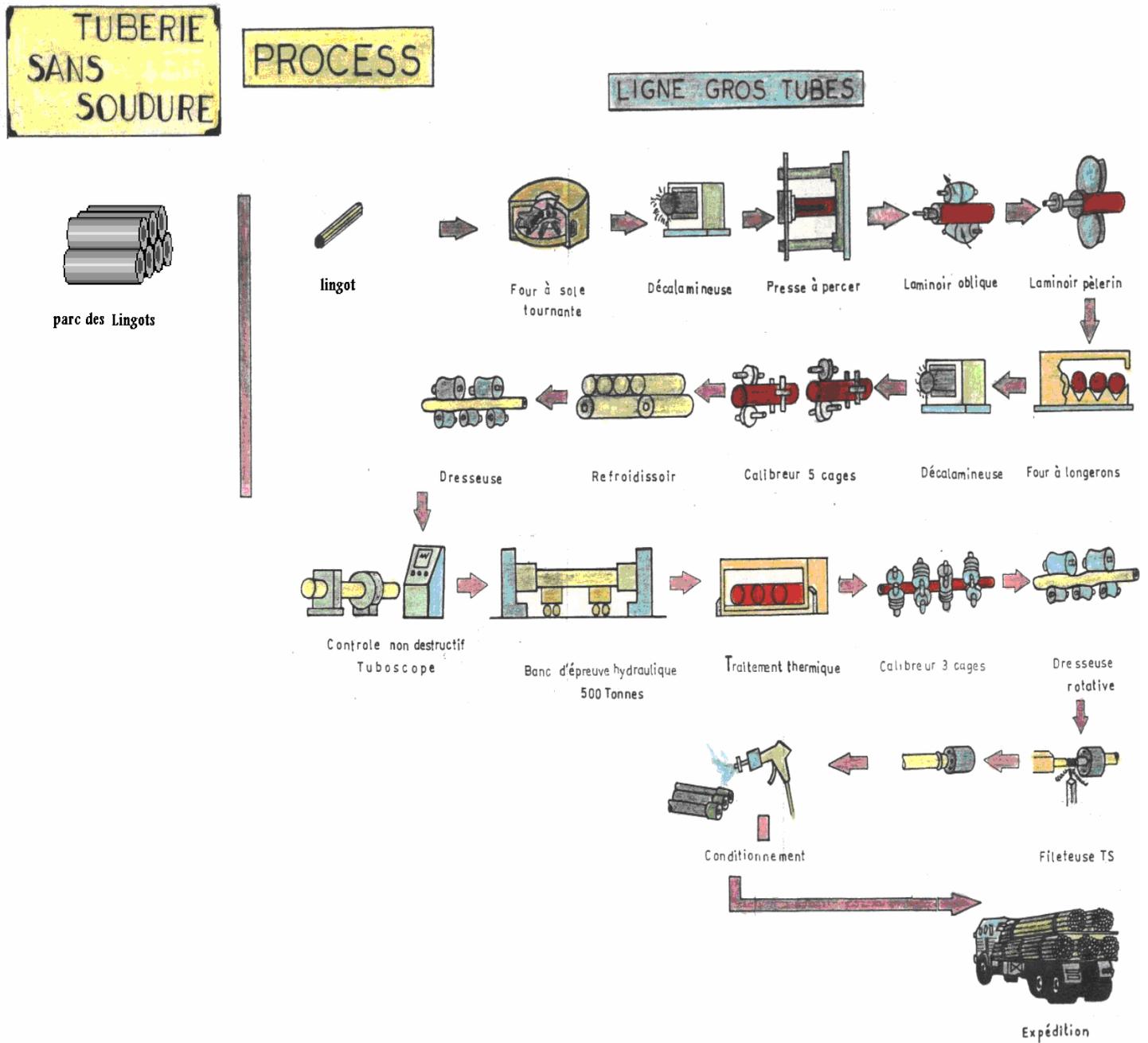


Figure 5 : Principaux postes de travail de fabrication des tubes

I.4. LABORATOIRE DES ESSAIS MECANIQUES

Pour s'assurer de la bonne qualité des produits finis et leur assurer un rôle fonctionnel adéquat, l'unité TSS est dotée d'un laboratoire d'essai et de contrôle de principales caractéristiques mécaniques exigées par les cahiers de charge.

CONCLUSION

En conclusion, ce stage nous a été bénéfique et instructif, mon stage me permis de constate et suivre le Processus de la fabrication de tube sans soudure.

Grâce au stage aussi j'ai enrichi mes connaissances théorique et de leurs applications au niveau industriel.

II.1.HISTORIQUE DU L'ALLIAGE DE L'ALUMINIUM

1854: première apparition de l'aluminium lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique

1886: invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA)

Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc...

II.2. OBTENTION DE L'ALUMINIUM

II.2.1. la bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

II.2.2. l'alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation d'alumine.

II.2.3. l'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.

II.3. PRINCIPALES PROPRIÉTÉS

- bon conducteur de la chaleur et de l'électricité
- faible masse volumique : 2,7 kg/dm³
- point de fusion : 658° C
- faible module d'Young : 70 GPa
- le coefficient de rigidité par unité de masse est sensiblement égal à celui de l'acier
- faible limite élastique
- fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)

La résistance à la corrosion est bonne à condition que la couche d'alumine soit formée car ensuite elle empêche la corrosion de pénétrer dans l'aluminium.

Par contre l'association avec un métal plus électropositif (acier, alliages de cuivre) détruit la couche d'alumine qui ne peut donc plus protéger l'aluminium.

II.4. L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 2024

II.4.1 Avantage et inconvénients du l'alliage 2024

- Des caractéristiques mécaniques élevées après revenu.
- Une bonne tenue à chaud.
- Une résistance chimique moins bonne que celle des alliages sans cuivre.
- Des risques de corrosion intergranulaire.
- Des possibilités de soudage limitées.

II.4.2. Domaine d'utilisation du l'alliage 2024

Ces alliages sont utilisés dans des structures à résistance mécanique élevée :

- Aéronautique : train d'atterrissage, ferrures d'ailes, tôles minces pour revêtement, tôles épaisses pour structure intégrale des avions, produits filés.
- Armement : galet et moyeux de chenilles de char, obus.
- Mécanique : poutrelle.

II.4.3. ténacité de l'aluminium

La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures. Cette propriété est caractérisée par le critère K_{IC} .

Valeurs de K_{IC} pour l'alliage 2024 dans le tableau 1 :

Alliage	K_{IC} -MPa \sqrt{m}
2024-T3	21-23
2024-T8	17-19

Tableau 1 : ténacité pour l'alliage 2024

II.5 NOTION DE MECANIQUE DE RUPTURE

Les méthodes classiques d'étude des structures et de leurs composants sous chargement statique, sont en général basées sur le fait que l'on veut éviter la ruine par plastification ou par flambement. L'estimation de la résistance au chargement est fondée sur les théories conventionnelles de la Mécanique du solide qui s'appuie sur l'analyse des contraintes.

Les procédures conventionnelles d'étude de la rupture par fatigue sont basées sur des résultats d'expérience de détails géométriques particuliers et pour un matériau donné. Aucune de ces procédures n'est capable de tenir compte des effets des concentrations sévères de contraintes ou de défauts du type fissuration.

La présence de tels défauts est pourtant plus ou moins inévitable dans la pratique. Les modes de ruine les plus sensibles à la présence de défauts de type fissure sont la rupture et la fatigue. La Mécanique de la rupture est l'étude des effets des fissures sur les contraintes locales et les champs de déformation plastique au voisinage du fond de fissure ainsi que leurs conséquences.

L'application des méthodes de la Mécanique de la rupture permet de mener des analyses pour prédire les effets des défauts sur la défaillance d'un grand nombre de formes géométriques différentes et pour compléter les informations obtenues par des essais. Pour la fatigue des structures soudées, la performance est affectée de manière considérable par la présence de minuscules défauts inhérents au soudage.

Les analyses par la Mécanique de la rupture peuvent aider à prédire les effets des variations géométriques sur le comportement à la fatigue.

Les méthodes de la Mécanique de la rupture sont particulièrement utiles car elles permettent d'estimer les effets des défauts. Elles aident à choisir les procédures d'inspection des structures lors de la fabrication ainsi que les niveaux d'acceptation des fissures qui peuvent être détectées durant ces inspections.

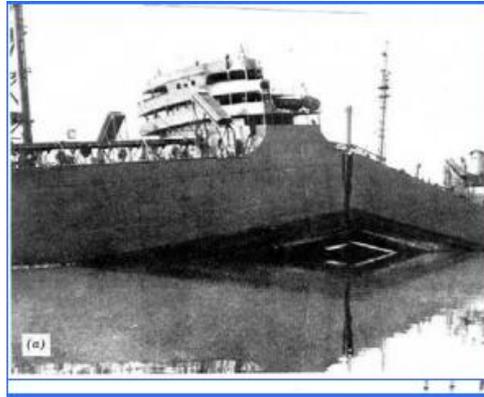


Figure 1 :un pétrolier de ravitaillement de la Seconde Guerre Mondiale (S.S. Schenectady qui se brisa en 1941).



Figure 2 : Rupture d'un autopont lors d'un tremblement de terre.

II.5.1. Les types de rupture

Les ruptures brutales peuvent en effet être soit de type ductile, soit de type fragile. On parlera de rupture fragile lorsque l'énergie absorbée par la rupture est très faible, on parlera de rupture ductile lorsque cette énergie est élevée.

Les céramiques et les verres sont fragiles, mais certaines céramiques peuvent néanmoins absorber une énergie significative lors de leur absorber une énergie significative

lors de leur rupture lorsque de nombreuses fissures se développent simultanément. On parle alors de comportement quasi-fragile.

Les métaux sont généralement ductiles mais les aciers présentent pourtant une transition ductile-fragile lorsqu'on abaisse la température et deviennent fragiles à froid. C'est par cette transition que l'on explique la rupture de plusieurs liberty-ship au cours de la seconde guerre mondiale lors des mois rigoureux d'hiver ou les conséquences dramatiques de l'impact d'un iceberg sur la coque du Titanic.

Lorsque la rupture est associée à de grandes déformations plastiques et à une grande dissipation d'énergie, on parle de rupture ductile ou de déchirure ductile.

La rupture d'un matériau peut être fragile sans déformation plastique ou au contraire avec déformation plastique importante (rupture ductile) voir la figure 4 :

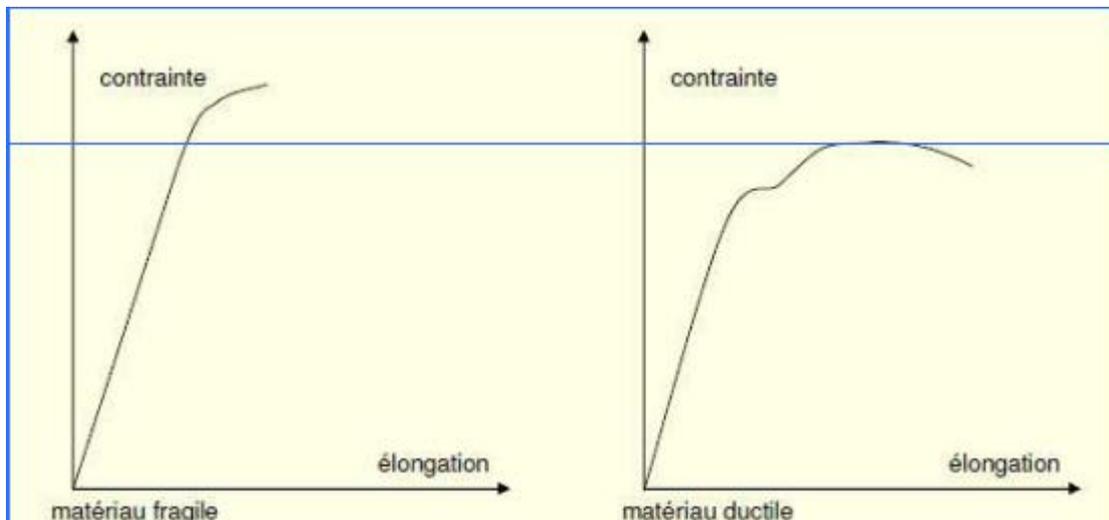


Figure 3 : la différence entre rupture fragile et ductile

II.5.2. Modes de propagation d'une fissure

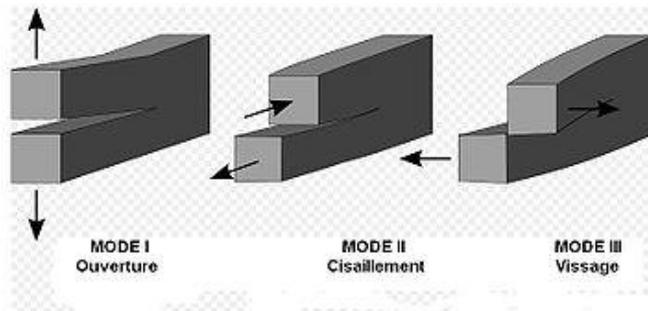


Figure 4 : Illustration des trois modes de propagation d'une fissure.

Il existe trois façons d'appliquer une force pour permettre à une fissure de se propager :

- Mode I - Une contrainte de traction normale au plan de fissure,
- Mode II - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure, et
- Mode III - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes.

II.5.3. Détermination des facteurs d'intensité de contrainte

Le concept de facteur d'intensité de contrainte (K) fut introduit comme étant le paramètre définissant les champs de contrainte et de déformation au front de fissure ; ainsi, dans le plan de fissure situé à l'avant de celle-ci, la contrainte normale à la fissure est donnée par :

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1)$$

Où r est une petite distance en avant du front de fissure, dans le plan de fissure.

Le facteur d'intensité de contrainte K contrôle également les déplacements d'ouverture des faces intérieures de la fissure proches du front de fissure pour des conditions élastiques.

II.6.LA TENACITE

II.6.1. Généralités

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure ; cela s'oppose à la fragilité.

Plus précisément, on définit la ténacité comme étant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de casser. Les matériaux pouvant se déformer plastiquement ont donc une plus grande ténacité que les matériaux à déformation uniquement élastique comme le verre.

Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-entaillée. En exerçant sur cette éprouvette un système de forces appropriées, on soumet sa fissure à un mode d'ouverture et on évalue l'énergie élastique libérée par la progression de la fissure. La ténacité est proportionnelle à la racine carrée de cette énergie.

II.6.2. mesure de la ténacité

II.6.2.1. essai de traction

Il consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile L_0 . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante (fig.5).

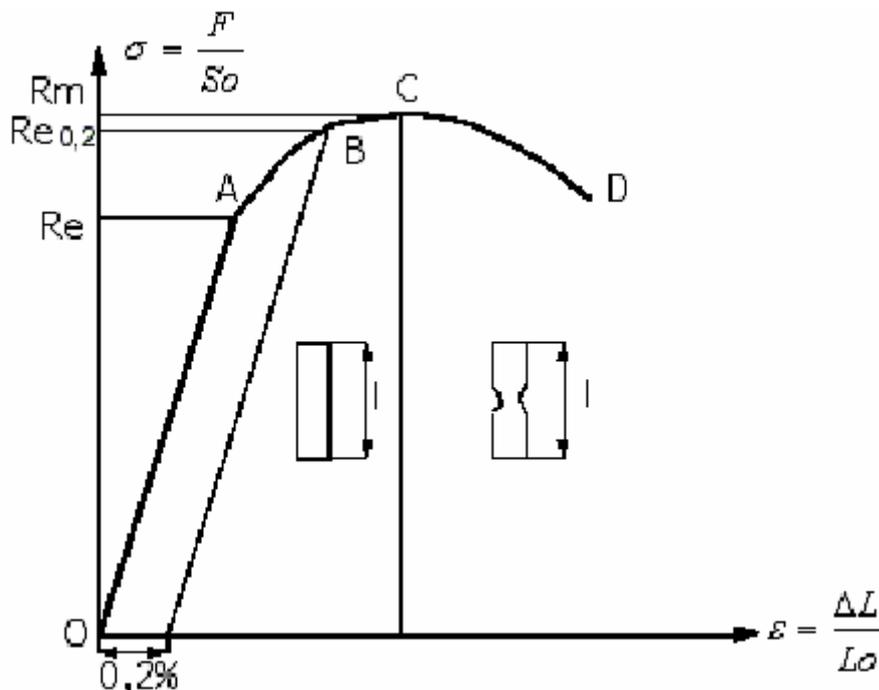


Figure 5 : Courbe type de l'essai de traction (D'après [10])

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

Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continu d'augmenter, cette instabilité est appelé instabilité plastique. La striction apparaît ; et en D la rupture de l'éprouvette se produit.

On peut calculer la ténacité d'après la courbe de traction où la ténacité égale l'aire de la courbe

II.6.2.2. essai de résilience

II.6.2.2.1. But de l'essai

L'essai qui demeure le plus utilisé pour évaluer la sensibilité à la rupture fragile au niveau des joints soudés est l'essai de résilience. Il présente l'avantage d'être très simple et qui portant sur des éprouvettes un entaille de petites dimensions offre la moyenne d'une détermination localisée et permet donc d'effectuer des comparaisons en fonction de la position de l'entaille au sein de la soudure essayée.

Donc le but de cet essai est de mettre en évidence les propriétés de ténacité du métal; on désigne par ténacité la propriété que présente un métal difficile à rompre au choc, par opposition à la fragilité qui est la propriété de la rupture fragile, avec au pas de déformation plastique.

Il est à noter que, une rupture peut se caractériser par toute absence de déformation permanente avant rupture, la rupture est dite rupture fragile, au contraire, une certaine déformation permanente peut précéder la rupture, on à donc une rupture ductile, comme elle peut être une rupture mixte, ce qui est souvent le cas.

II.6.2.2.2. Principe de l'essai

L'essai de résilience, effectué sur un appareil appelé mouton pendule ou mouton de Charpy (fig.7), mesure l'énergie consommée lors de la rupture forcée d'une éprouvette avec entaille. Ceci se fait typiquement en mesurant la perte d'énergie d'un pendule qui est lâché en chute libre et qui, sur son chemin, casse une éprouvette, cette perte d'énergie s'appelle « résilience » d'un matériau.

Elle est définie par :

$$\text{RESILIENCE} = \frac{\text{ENERGIE ABSORBEE PAR LA RUPTUR [JOUL]}}{\text{SECTION AU DROIT DE LENTAILLE [Cm2]}}$$

II.6.2.2.3. Lamachined'essai

La machine d'essai est un mouton pendule de type 'PSW', il sert à conduire des essais de résilience par choc selon CHARPY (Fig.6).

Le mouton pendule se compose de la cabote en fonte, de roulement à friction réduite pour le pendule et du bras de levage avec déclenchement de sécurité (manœuvré à l'aide des deux mains)

Les contre supports et appuis sont vissés au chabots ; un dispositif d'alignement des éprouvettes se trouve au contre support de droite.

Après rupture de l'éprouvette, le pendule qui n'est pas encore stabilisé est arrêté à l'aide du frein électromagnétique en actionnant le bouton poussoir. Le mouton pendule à une puissance de travail égale à 300 joules avec un angle de levage max(α angle de frappe) égale à 160° , il pèse 20,394 Kg, la longueur du bras de $L = 770\text{mm}$.

L'énergie dépensée pour rompre une éprouvette est donnée par la formule :

$$W = M.g.L. (\cos \alpha - \cos \beta) \quad [\text{J}]$$
$$KCV = \frac{W}{S} \quad [\text{J/cm}^2]$$

Cette énergie dans notre machine est donnée directement sur un écran gradué. On distingue trois modes de rupture caractérisées par des faciès de rupture différents

- Rupture fragile, sans déformation plastique, faible énergie, caractérisée par une surface à grains d'aspect brillant.
- Rupture ductile, se faisant avec une forte déformation plastique, haute énergie, caractérisée par une surface à nerf ayant un aspect mat à cupules.
- Rupture mixte, dans ce cas on observe les deux types de surfaces

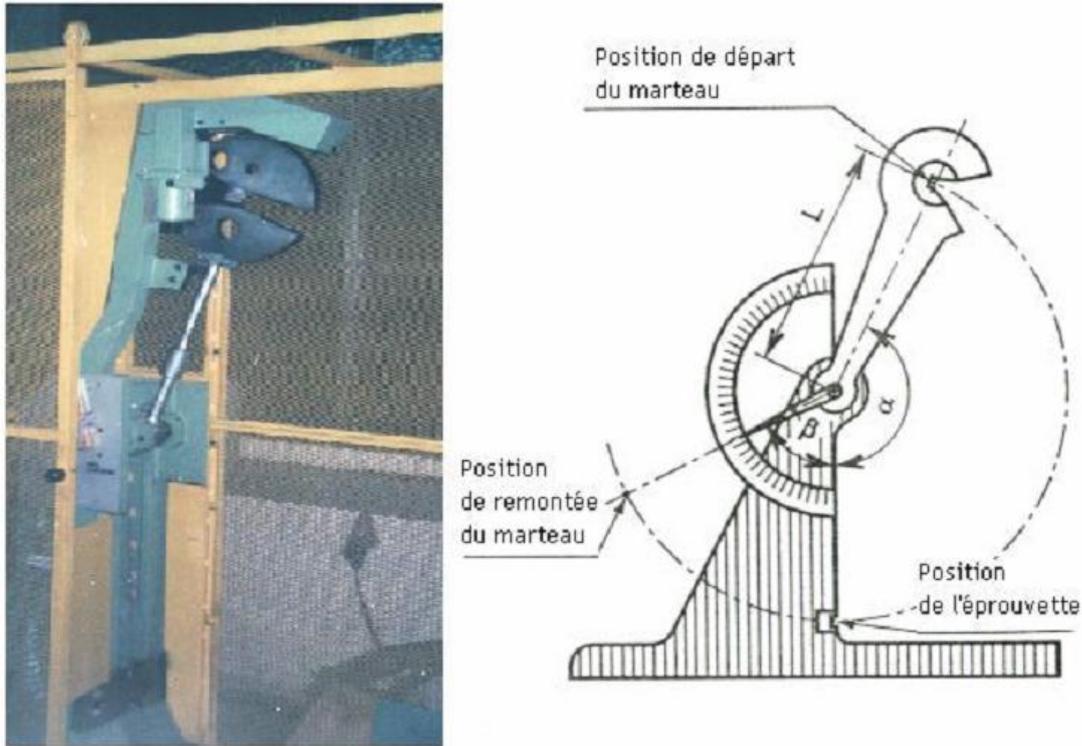


Figure 6: Machine d'essai de résilience « Mouton de Charpy »

II.6.2.3.mecanique de rupture

II.6.2.3.1.principe

Il faut évidemment travailler avec des éprouvettes fissurées, les fissures sont amorcées au fond d'entailles usinées, les normes proposent plusieurs types d'éprouvettes entaillées pour lesquelles sont données les valeurs du facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction de la longueur a de la fissure rapportée à la largeur W de l'éprouvette. Il n'est pas interdit de se servir d'éprouvettes différentes à condition de préciser la source du calcul du facteur d'intensité de contrainte utilisé. Une des éprouvettes les plus courantes est l'éprouvette CT, de *Compact Tension* en anglais, qui est la plus économe de matière. Le choix de l'épaisseur B de l'éprouvette détermine par similitude toutes les autres dimensions.

Cette épaisseur procure la désignation de l'éprouvette : on parlera par exemple d'une éprouvette CT25 dont l'épaisseur est égale à 25 mm

II.6.2.3.2.dépouillement de l'essai

En général, l'enregistrement réalisé au cours de l'essai, de la force appliquée à l'éprouvette en fonction de l'ouverture du capteur, présente une déviation par rapport à la linéarité un peu avant la propagation brutale de la fissure.

Pour calculer la valeur du facteur d'intensité de contrainte correspondant K_{Qil} faut connaître la longueur de la fissure au début de la propagation. Elle peut être mesurée aisément sur la cassure en raison de la différence de facies entre la fissure de fatigue et la rupture finale.

II.7.TRAITEMENTS MECANIQUES DE SURFACE

II.7.1.Généralités

Les traitements mécaniques de surface (TMS) sont des traitements à l'aide desquels les couches superficielles sont déformées plastiquement par une action mécanique, projection de particules (grenailage, sablage,...), déformation par pression (brunissage, galetage,...). L'action mécanique permet de modifier et d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques d'un métal (rugosité, forme, contraintes, dureté).

Les traitements mécaniques sont applicables à tous les métaux déformables quel que soit leur traitement initial [21]. Leur réactivité dépend de leurs propriétés mécaniques (allongement, dureté,...).

les propriétés mécaniques usuelles des métaux se rattachent aux notions courantes d'élasticité et de plasticité. La déformation plastique apparaît lorsque les contraintes dépassent les limites élastiques, cette déformation est liée au déplacement des atomes à l'intérieure des grains à de grandes distances atomiques qui provoque des modifications de forme permanentes. Ainsi après la suppression de la charge, le corps ne rétablit plus sa forme, sa structure et ses propriétés [9], il acquière en contrepartie en surface, de nouvelles propriétés mécaniques et topographiques [22].

II.7.2. GALETAGE

II.7.2.1. Généralités

L'aptitude d'une pièce mécanique (ou d'une structure) à remplir une fonction donnée dépend d'un ensemble de facteurs parmi lesquels la résistance mécanique telle que : la tenue en fatigue. Cette dernière est le plus souvent influencée par le choix du matériau, des méthodes de fabrication et des traitements de surface qui lui sont associés. A cet effet plusieurs procédés (fig. 1.) avec des machines-outils appropriées ont été créés et qui diffèrent entre eux par le mode de travail, car il est évident que pour finir une pièce, on recourt très souvent à une série d'usinage de finition moyennant parfois un prix de revient élevé. Par ailleurs, les couches superficielles étant les plus sollicitées en service sont donc les premières à se dégrader par suite des différentes actions de contact aussi bien avec les pièces conjuguées qu'avec le milieu environnant. C'est alors qu'il est souhaitable de disposer de moyens et techniques capables de fournir aux pièces leurs qualités finales et d'améliorer leur durée de vie en fatigue.

Dans plusieurs domaines de l'industrie mécanique, les meilleurs résultats pour les pièces à risque d'endommagement par usure, corrosion ou fatigue sont obtenus en effectuant un traitement qui allie un bel état de surface à un durcissement superficiel associé à une précontrainte de compression. Ces résultats sont souvent retrouvés au moyen des traitements mécaniques de surface tel que le galetage [6-8].

Depuis 1935, date de sa première mise en œuvre aux U.S.A, le galetage est devenu l'un des traitements mécaniques de surface (TMS) dont l'utilisation est largement répandue dans différentes branches de l'industrie au cours de ces dernières années. Au stade actuel de la technique, il ne peut plus être rejeté en raison de sa grande rentabilité. Auparavant, il a été appliqué initialement au profit de l'industrie ferroviaire et avait permis le traitement mécanique des essieux de wagons et des motrices de chemin de fer. Et si le galetage s'impose dans différentes branches de l'industrie, son utilisation à plus grande échelle est freinée par l'ignorance des opérations qui le caractérisent, des conditions de sa mise en œuvre, en particulier du processus élastoplastique mis en jeu.

L'importance de ce traitement appliqué en l'occurrence sur des pièces faisant partie des constructions aéronautiques a motivé cette étude.

II.7.2.2. But du procédé

A l'aide de galets tournants, la couche superficielle de pièces ébauchées en matériau déformable est amenée à s'écouler (fluage) sous une certaine pression. Ce procédé considéré comme un traitement mécanique de surface (MST) met en œuvre une déformation plastique à froid des couches superficielles et agit aussi bien sur les propriétés géométriques que physiques du matériau. Ce traitement intéresse même les pièces de grande dureté ($HRC > 60$) et peut être appliqué sous différentes techniques [17-19] selon l'objectif à atteindre. On obtient ainsi une amélioration du poli de cette surface par un galetage de surface (fig. 7a), une amélioration de l'exactitude des côtes par un galetage dimensionnel (fig. 7b) et une augmentation de la résistance mécanique par un galetage de renforcement (fig. 7c).

II.7.2.3. Types du procédé

i) Le galetage de surface ; est en fait un galetage d'aspect, il permet d'améliorer la surface du point de vue macro et micro géométrique. La tolérance finale pour ce procédé dépend de l'opération d'usinage de préparation plutôt que de celle du galetage lui-même. Lors de la préparation de la pièce, il faut tenir compte d'une surépaisseur d'ébauche variable selon le mode d'usinage de préparation (15 à 20 μm pour les pièces tournées et 2 à 4 μm pour les pièces rectifiées)

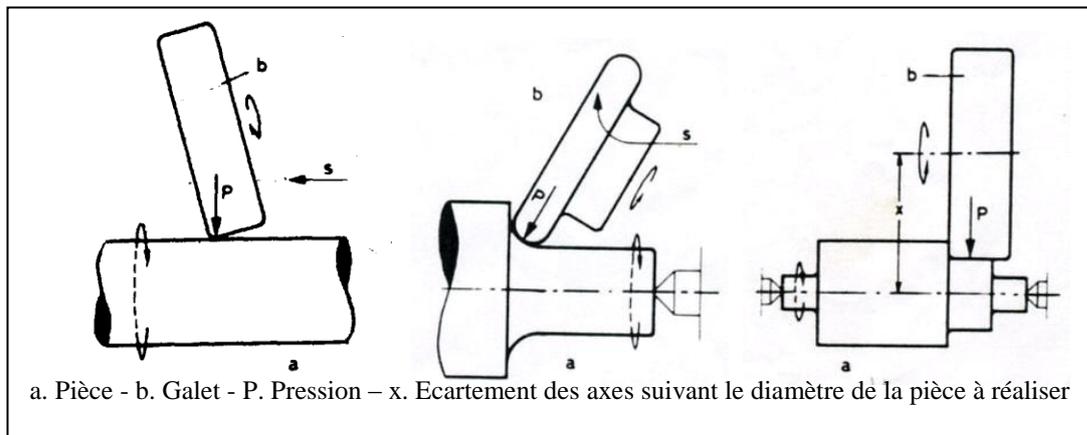


Figure 7 : Différents types de galetage a) Galetage de surface ; b) Galetage dimensionnel, c) Galetage de renforcement

Le galetage de surface se distingue des autres méthodes classiques de finition qui entraînent l'enlèvement d'une quantité de matière parfois infime. L'amélioration des tolérances n'est possible que dans des ordres de grandeurs très faibles.

ii) *Le galetage dimensionnel*; contrairement au galetage d'aspect, a pour but l'obtention des tolérances serrées. La qualité des surfaces ou d'aspect a une importance secondaire. Avec ce type de galetage, on peut obtenir des tolérances de l'ordre de 0,02 mm Alors que pour l'ébauche, la tolérance se situe entre 0,10 et 0,15 mm

iii) *Le galetage de renforcement* ; est celui qui nous intéresse le plus essentiellement ; ce type de galetage est le plus souvent utilisé pour le formage des pièces aéronautiques. Non seulement le galetage de renforcement améliore l'état de surface par polissage, mais il permet l'augmentation de la limite d'endurance en fatigue des pièces de constructions soumises à de grands efforts. Son action peut être comparée dans certaines mesures à celle d'un grenaillage fin ou à celle d'un martelage mécanique mais son uniformité est plus grande [17].

Dans tous les cas, le galetage a lieu par déformation plastique superficielle à froid produisant des surfaces uniformes, denses sans enlèvement de matière. Il est capable d'offrir des avantages variés qu'on ne peut pas obtenir avec les techniques des procédés conventionnels d'enlèvement de matière. Parmi ces avantages on peut citer l'indice technico-économique caractérisé par :

-Réduction du coût de l'opération (faible temps de fabrication)

-Augmentation de la durée de vie

-Amélioration des caractéristiques de fatigue.

II.7.2.4.Effets du procédé

Après galetage, sous la pression des galets, les saillies superficielles du métal se répartissent dans les creux de rugosité et les remplissent. C'est ce nivellement qui donne au métal une surface de haute qualité. A cause de la déformation plastique superficielle, il se produit un allongement du grain dû à l'écrouissage. Il s'en suit une orientation des cristaux dans le sens du galetage et une consolidation des couches superficielles. La couche affectée par ce traitement est déterminée par la limite d'écoulement du matériau et peut être influencée par la forme et le diamètre des galets. Elle dépend de la force appliquée et peut atteindre une profondeur de pénétration de 3 à 12 mm [20]. De plus, il se produit des précontraintes de compression en cas de dépassement de la limite d'élasticité. Ces précontraintes, rigoureusement réparties ont une influence favorable à l'endurance du matériau dans les zones fortement chargées telles que : les gorges et les raccords avec diminution de section soumis à des charges alternées de fréquences variables [18].

II.7.2.5. L'état de surface

Le souci d'avoir des surfaces de qualité irréprochable, conjugué à celui de la rentabilité impose le galetage de surface comme moyen d'usinage. Car il est évident que pour un usinage classique, les frais de fabrication augmentent très rapidement avec une rugosité décroissante.

En se déformant, les crêtes des aspérités de surfaces s'aplatissent dans les creux et assurent un bon lissage de la surface. La hauteur moyenne des creux et crêtes de rugosité peut être réduite de 30 à 50 % [19]. Une rugosité (Ra) d'usinage de 4 et 4,5 μm peut être finie par galetage jusqu'à 0,77 et 0,5 μm [21,22]. Le taux d'amélioration de la rugosité peut atteindre jusqu'à 91% [8]. En optimisant les paramètres du galetage, la rugosité initiale d'un acier AISI20 peut être améliorée de 1 à 0,07 μm , celle du bronze de 5,92 à 0,172 μm [23,24]. Grâce à ces effets bénéfiques, pour générer une surface de haute qualité, une alternative aux procédés d'usinage de finition peut être donnée par un galetage de précision.

II.8.FATIGUE

II.8.1.Phénomène de fatigue

Il est de première importance sur les structures d'avion et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission...). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue, un effet de résonance peut l'amplifier. La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_r et R_e).

II.8.2. Définition

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux.

II.8.3.Types d'essais de fatigue

Il existe plusieurs types d'essais de fatigue. Certains essais utilisent de petites éprouvettes et se déroulent en laboratoire pour déterminer les caractéristiques de fatigue de divers matériaux.

On distingue alors:

a. les essais de durée de vie en fatigue qui mesurent essentiellement le nombre de cycles pour amorcer une fissure de fatigue

b. les essais de propagation de fissure qui mesurent la vitesse de propagation de la fissure (en termes de variation de longueur par cycle) en fonction de la sévérité de la charge appliquée.

D'autres essais se font directement sur des structures complètes (par exemple des fuselages complets d'avion) ou sur des éléments.

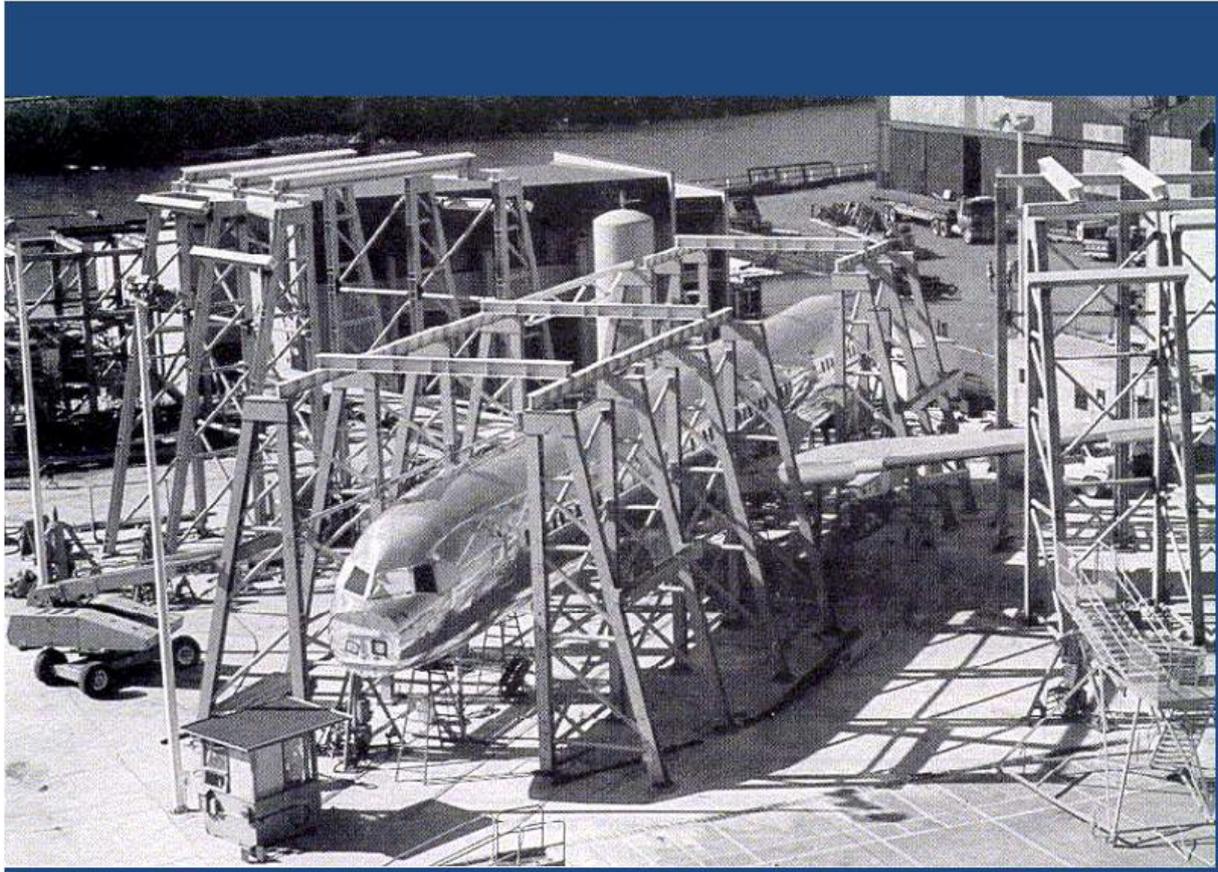


Figure 8 :des fuselages complets d'avion.

Dans l'étude de la fatigue dans le cadre du dimensionnement de conception, on distingue deux situations.

Dans la première, on admet qu'aucun défaut n'est présent dans l'élément considéré et que l'amorçage d'une fissure de fatigue est l'événement critique qui contrôlera la durée de vie.

Cette situation conduit à l'approche de dimensionnement « durée de vie ».

Dans la deuxième situation, on admet que des fissures existent dans la structure dès sa fabrication et que la durée de vie est contrôlée par la propagation de ces fissures jusqu'à une taille critique au delà de laquelle elles deviennent instable. C'est l'approche tolérance à l'endommagement (damage tolerance) appliquée pour les avions de ligne.

Essai de fatigue en flexion rotative Machine d'essai de fatigue R.R. Moore :

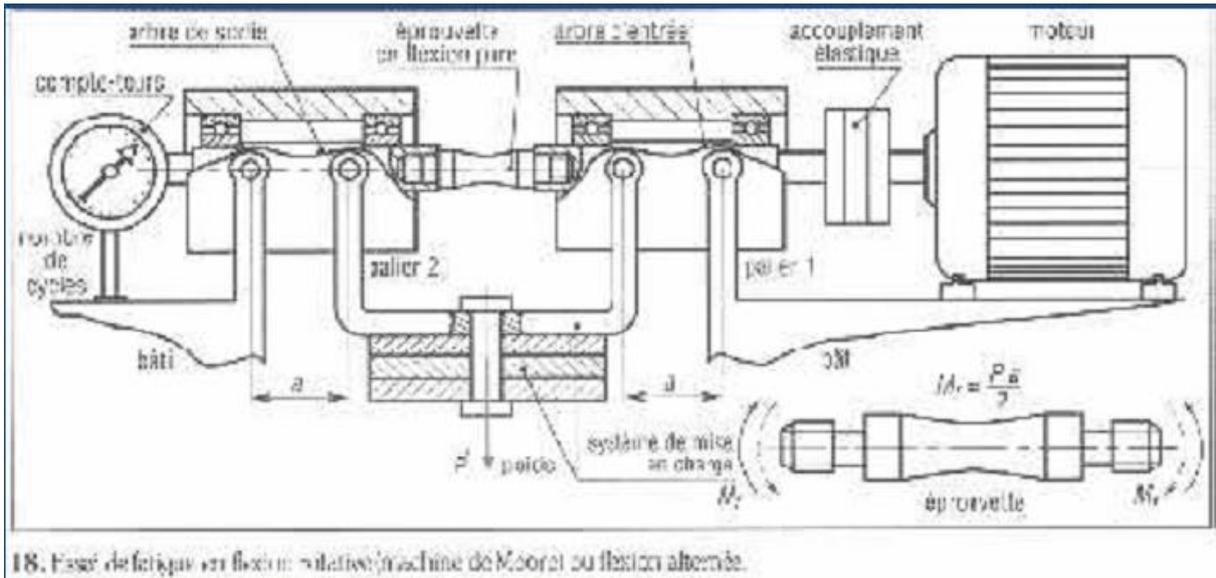


Figure 9 : Essai du fatigue jusqu'à la rupture

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante (souvent nulle) et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée. Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (σ, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à plan (σ, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure suivante :

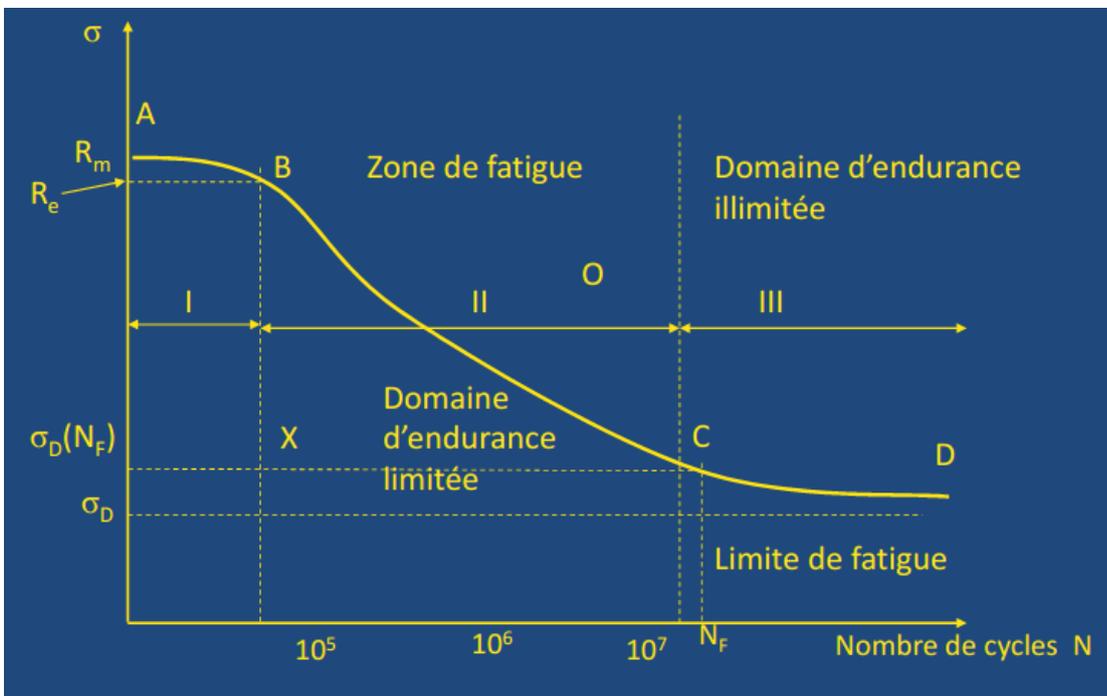


Figure 3 : courbe S.N (Stresses – Number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule courbe qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques ; N_R est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

I	Domaine plastique oligocycle
II	Domaine d'endurance limitée
III	Domaine d'endurance illimitée
X	Zone de non rupture probable
O	Zone de rupture probable
R_m	Charge de rupture
R_e	Limite d'élasticité
σ_D	Limite de fatigue
$\sigma_D(N_F)$	Limite d'endurance conventionnelle à N_F cycle

II.8.4. Limite d'endurance

On remarque que la courbe présente une asymptote horizontale pour N tendant vers $+\infty$. Cela signifie que pour les amplitudes de contrainte σ_a faibles, on ne peut pas avoir de rupture en fatigue dans des délais raisonnables (plusieurs années...).

Certains matériaux, comme les alliages d'aluminium, semblent avoir une asymptote nulle, d'autres une asymptote positive appelée limite d'endurance et notée σ_D ou SaD.

La détermination de la limite d'endurance se fait par des méthodes d'essais tronqués, c'est-à-dire que l'on se positionne à un nombre de cycles donné — typiquement un à cent millions (10^6 à 10^8) — et que l'on fait des essais à plusieurs niveaux d'amplitude de contrainte σ_a .

III.1. LE MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES :

III.1.1. Le matériau

Le matériau est un acier de nuance N80 destiné pour les pipes et les pipes de forage.

III.1.2 Composition chimique

La composition chimique du notre matériau selon le tableau.1

nuance	C%	S%	Mo%	Cr%	Mn%	P%	S%	V%	Nb%	Al%	Cu%	Sn%	Ni%	Ti%
N80	0,26	0,29	0,16	0,19	1,01	0,13	0,003	0,004	0,005	0,029	0,024	0,0	0,009	0,045

Tableau 1 : composition chimique de matériau

III.1.3 caractéristique mécaniques

Le tableau 2 donné les caractéristiques mécaniques de matériau

nuance	E (MPa)	R _{p(0,5)} (MPa)		R _m (MPa)	A%
		Max	Min		
		N80	204000		

Tableau 2 : caractéristique mécaniques

III.1.4. les éprouvettes

Les essais sont exécutés sur des éprouvettes plates de dimensionnement normalisé selon la norme API. Pour obtenus l'éprouvette on passe par les étapes suivant :

- 1- A chaque tube on va couper une vérole (fig : 1.a).
- 2- Avec la machine de coupe découpez une barrette d'une virole.
- 3- L'éprouvette obtenue par fraisage de barrette (fig : 1.b).
- 4- Avec lentilleuse on fait l'entaille sur l'éprouvette de résilience

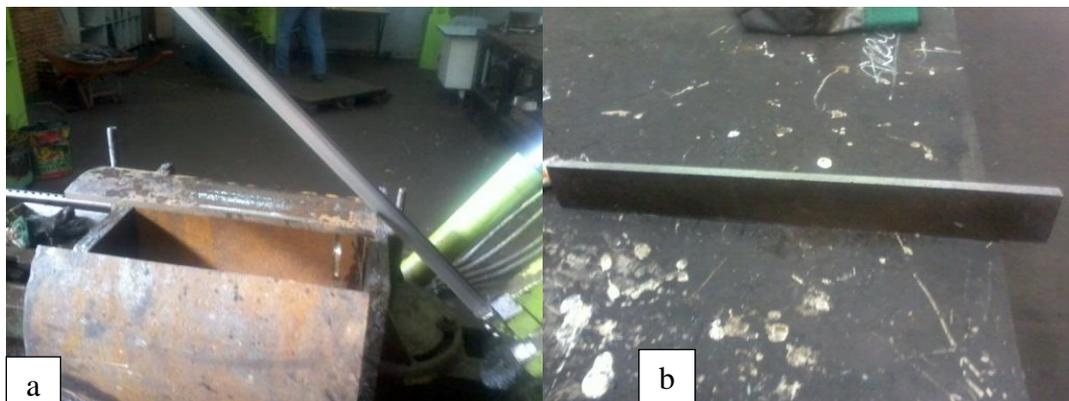


Figure 1 : Obtention des éprouvettes a) la vérole, b) la barrette

Les barrettes obtenues sont ensuite usinées sur fraiseuse verticale (fig :2)



Figure2 : Fraisage des barrettes

A l'issu des fraisages on obtient des éprouvettes qui répondent aux normes API (Fig 3 a et b).

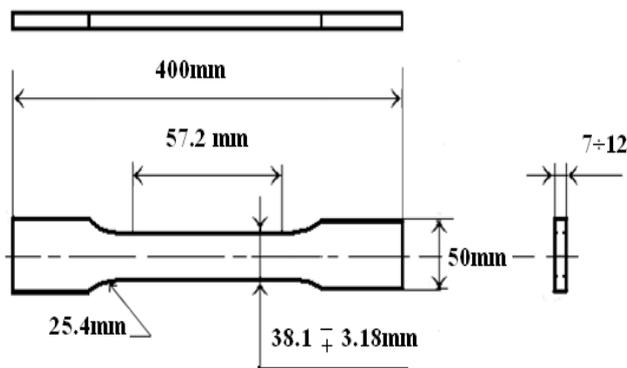


Figure 3: Eprouvette de traction : a) Géométrie, b) Photo

Il en est de même pour les éprouvettes de résilience (fig 4 a et b)

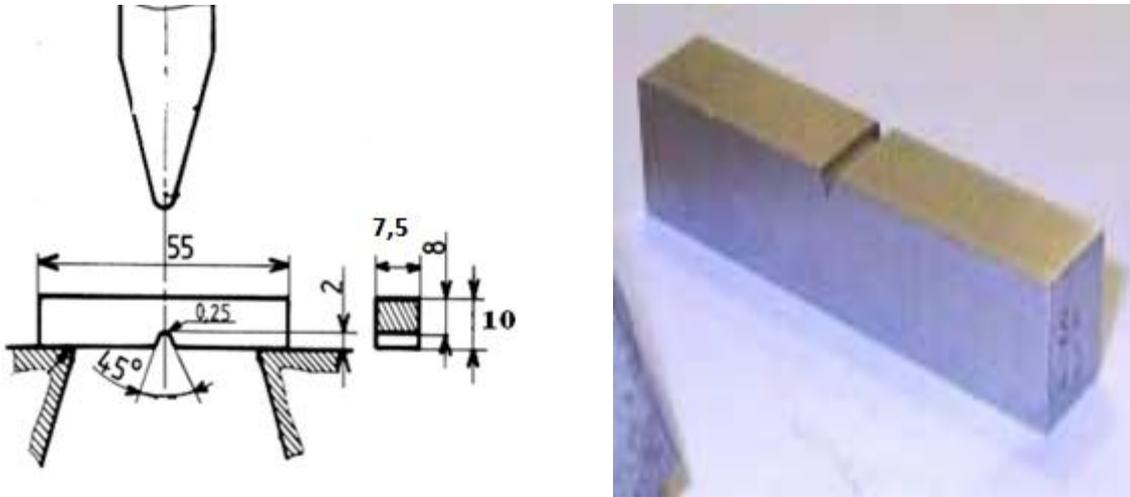


Figure4 : Eprouvettes de résilience : a) Géométrie, b) Photo

III.1.5. Déroulement des essais

III.1.5.1. Essais de traction

Les essais de traction sont réalisés au laboratoire d'essai mécanique de l'entreprise Arcelor-Mittal (AMPTA) sur une machine universelle de type Zwick/Roell de capacité 120 tonne. Les résultats sont recueillis par des capteurs et grâce à un logiciel, les données sont traitées puis affichées sur un écran d'ordinateur.



Figure 5 : la machine de traction.

III.1.5.2. Essai de résilience

L'essai de résilience est un complément à l'essai de traction. Il s'agit de rompre en un seul coup une éprouvette entaillée afin de mesurer l'énergie nécessaire pour effectuer cette rupture. Cet essai est réalisé sur un mouton-pendule.

Les essais de résilience sont réalisés au laboratoire d'essai mécanique de l'entreprise Arcelor-Mittal (AMPTA) sur une mouton pendule de Charpy de type MFL système de capacité 30 Kg.



Figure 6 : mouton pendule de Charpy.

III.1.5.3. Essai de dureté

Les essais dits de « dureté » mesurent la pression moyenne de contact des matériaux, lors de l'enfoncement d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) sur une surface plane.

C'est une manière de caractériser le comportement plastique du matériau.



Figure7 : La machine de dureté

III.1.6. le brunissage

L'opération du brunissage a été réalisée au moyen d'un dispositif préalablement étalonné à l'effort désiré (fig. 8). La partie active est une bille en acier dur.

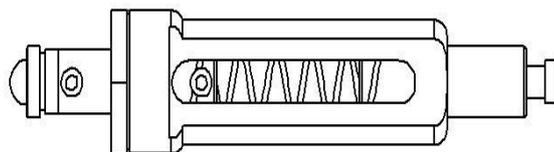


Figure 8 : Schéma du dispositif du brunissage

L'opération est conduite sur une fraiseuse verticale (Fig. 9) au bloc E du département de génie mécanique



Figure 9 :la fraiseuse

Les conditions de travail dégagées de la littérature sont comme suit :

$V=100\text{tr /min}$, $a=54\text{mm /min}$, la charge= 20Kg

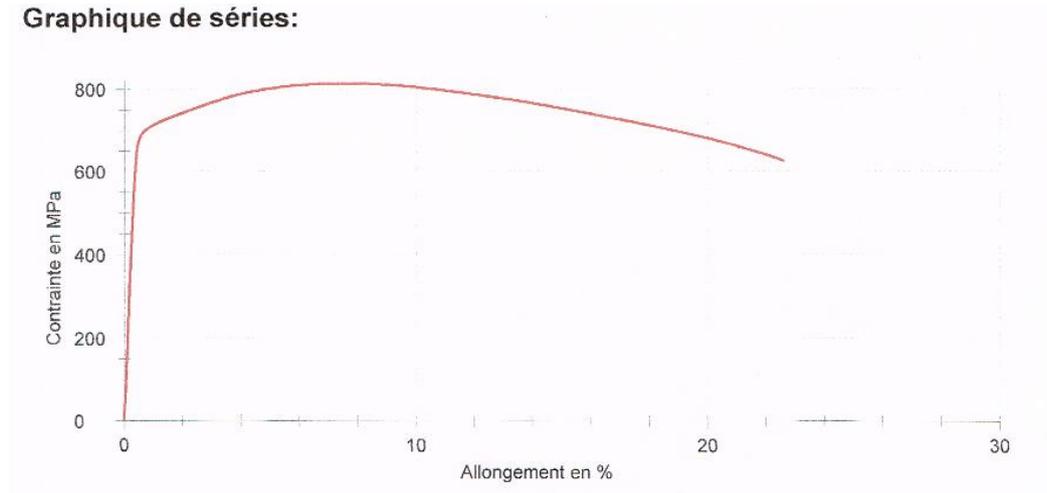
III.1.7. déroulement des essais

III.1.7.1. résultats d'essai de traction

A l'état traité par brunissage, les essais de traction ont donné les résultats suivant (tableau 3)

nuance	So (mm)	$R_{p(0,5)}$ (MPa)	Rm(MPa)	At %
N80	462,00	723,7	823,7	21,04

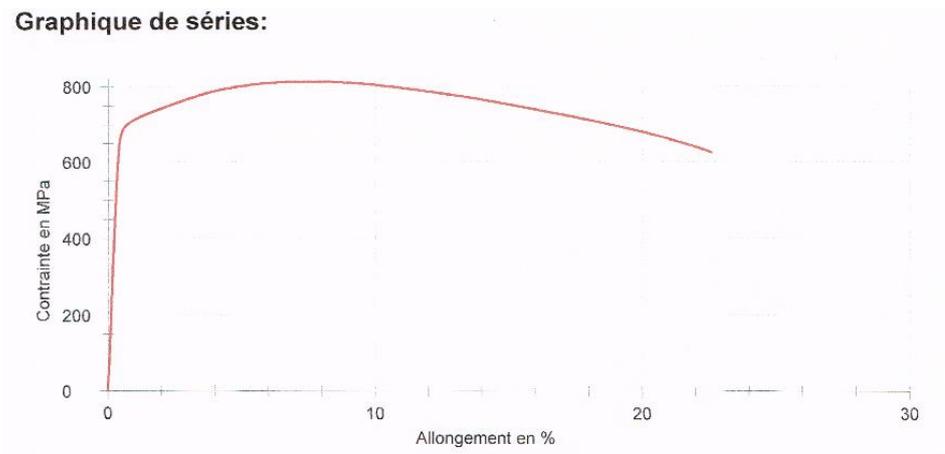
Graphique de séries:



A l'état traité par brunissage, les essais de traction ont donné les résultats suivant (tableau 4)

nuance	So (mm)	Rp0.5 (Mpa)	Rm(Mpa)	At %
N80	458,40	708,5	813,6	22,54

Graphique de séries:



III.1.7.2. Résultat d'essai de résilience

A l'état non traité par brunissage, les essais de résilience ont donné les résultats suivant (tableau 5) :

So(cm ²)			W (J)			KV= (W / S0)*9.81 [J/cm ²]			Moy
1	2	3	1	2	3	La résilience : K			
1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0,60	0,60	0,60	6,2	6,0	5,8	101,37	98,1	94,83	98,1

Tableau 5 : résultat de résilience (éprouvette usinée)

A l'état traité par brunissage, les essais de résilience ont donné les résultats suivant (tableau 6) :

So			W (kg)			KV= (W / S0)*9.81 [J/cm2]			
						La résilience : K			Moy
1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0,60	0,60	0,60	3,2	3,0	3,8	52,32	49,05	49,05	50,14

Tableau 6 : résultat de résilience (éprouvette brunie)

III.1.7.3.Résultat d'essai de dureté

A l'état non traité par brunissage, les essais de dureté ont donné les résultats suivant (tableau 7) :

Dureté HRB			
1	2	3	Moy
98	99	100	99

Tableau 7 : résultat de dureté (éprouvette usinée)

A l'état traité par brunissage, les essais de dureté ont donné les résultats suivant (tableau8) :

Dureté HRB			
1	2	3	Moy
97	98	99	99

Tableau 8 : résultat de dureté (éprouvette brunie)

II.2.CORRELATION ENERGIE DE RUPTURE K_V ET K_{IC}

Il y a une corrélation entre la résilience et le facteur d'intensité de contrainte qui permis de calculer le facteur d'intensité de contrainte à partir de résilience.

La corrélation selon la fonction suivante :

Si : $250 \leq R_e \leq 950$ (pour les aciers de construction à moyenne résistance)

$$\frac{KIc}{E} = 0,65 * K_V$$

IV.1. LE MATERIAU

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium Al-2024 (AU4G) livré à l'état T351 (trempé, tractionné et vieilli). Il est largement utilisé par les avionneurs.

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques données par l'aérospatiale sont les suivantes:

IV.1.1. Composition chimique

En % autre qu'Al est fournie dans le tableau.1. Une analyse au microscope électronique à balayage a révélé les constituants de la figure.1:

IV.1.2. Les caractéristiques mécaniques

Les valeurs moyennes mesurées dans les trois directions : L (Long), TL (Travers Long) et TC (Travers Court) sont consignées dans le tableau 2:

	Sens L	Sens TL	Sens TC
$\sigma_{e0,2}$ [MPa]	390	339	325
σ_r [MPa]	500	442	456
A%	19,7	17,3	7,1

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques fournies par la firme ALCOA sont consignées dans les tableaux 3 et 4 :

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autres
Mini.	-	-	3,8	0,3	1,2	-	-	-	-
Maxi.	0,5	0,5	4,9	0,9	1,8	0,1	0,25	0,15	0,15

	Sens L	Sens TL	Sens TC
$e_{0,2}$ [MPa]	313 ÷ 326	-	-
r [MPa]	460 ÷ 465	-	-
A%	11,2 ÷ 16,2	-	-

IV.2. EPROUVETTES

IV.2.1. Prélèvement

Les éprouvettes ont été prélevées dans des tôles standard de qualité industrielle. Ces éprouvettes ne devant pas se déformer lors de leur usinage (relaxation des contraintes internes), seront usinées par rapport à l'axe neutre du panneau brut. Toute la série des éprouvettes devra être prélevée dans un même panneau.

Les trois directions L, TL et TC ainsi que des repères "pied du raidisseur - tête du raidisseur" ont été repérés sur les panneaux avant, pendant et après l'usinage des éprouvettes.

IV.2.2. Géométrie et usinage des éprouvettes

Les éprouvettes représentatives de structures industrielles sont des plaques mince d'épaisseur $t = 4,5$ mm. Toutefois pour la calibration des essais une épaisseur $t = 12$ mm a été également retenue. Ces éprouvettes présentent une forme dite " taille de guêpe" (TG). Leurs géométries et leurs cotations sont données sur la figure 2.

L'usinage des éprouvettes est réalisé par un fraisage en roulant (fig. 3) tout en respectant les conditions d'usinage (lubrification et profondeur de passe) des raidisseurs des panneaux. La vitesse d'usinage sera adaptée à la géométrie des éprouvettes (vitesses diminuée par rapport aux conditions réelles d'usinage).

Les conditions de galetage sont identiques aux conditions de production. La machine utilisée est une machine de production spécifique au galetage des raidisseurs. Le galet utilisé est en forme de molette de diamètre 40 mm actionné par un vérin de section 14,5 cm².

Selon le cas, ces éprouvettes ont subi un décapage sulfochromique d'une profondeur de 0.5µm/min pendant 5 à 10 min. Ce décapage est suivi d'une oxydation anodique chromique (O.A.C) dans un bain d'acide chromique. Il se forme sur cette dernière, un dépôt d'alumine de 2 à 3 µm ayant pour effet principalement la prévention contre les risques de corrosion de la pièce.

Les paramètres de galetages retenus pour cette première investigation sont consignés dans le tableau 5:

Eprouvettes épaisses (t = 12 mm)		
P (bars)	i	OAC
Non Galetées		Avec
120	1	Avec
200	1	Avec
	3	Avec

Les zones à galeté sont marquées sur le dessin des éprouvettes par une zone hachurée (fig.2). Pour éviter un ébavurage qui pourrait être non uniforme et jouer le rôle de concentrateur de contraintes aux angles des éprouvettes ; les bords ont été cassés par un chanfrein de $0,30 \pm 0,05$ mm

IV.3. DISPOSITIF D'ESSAI ET INSTRUMENTATION

Pour caractériser la durée de vie et étudier l'influence du galetage sur la tenue en fatigue de l'alliage Al 2024 ; des essais de fatigue industrielle [16] ont été réalisés sur différentes éprouvettes galetées sous des conditions (pression et nombre de passes) variées. Selon le cas, ces éprouvettes ont subi un décapage sulfochromique d'une profondeur de $0.5\mu\text{m}/\text{min}$ pendant 5 à 10 min. Ce décapage est suivi d'une oxydation anodique chromique (O.A.C) dans un bain d'acide chromique [14,15]. Il se forme sur cette dernière, un dépôt d'alumine de 2 à 3 μm ayant pour effet principalement la prévention contre les risques de corrosion de la pièce.

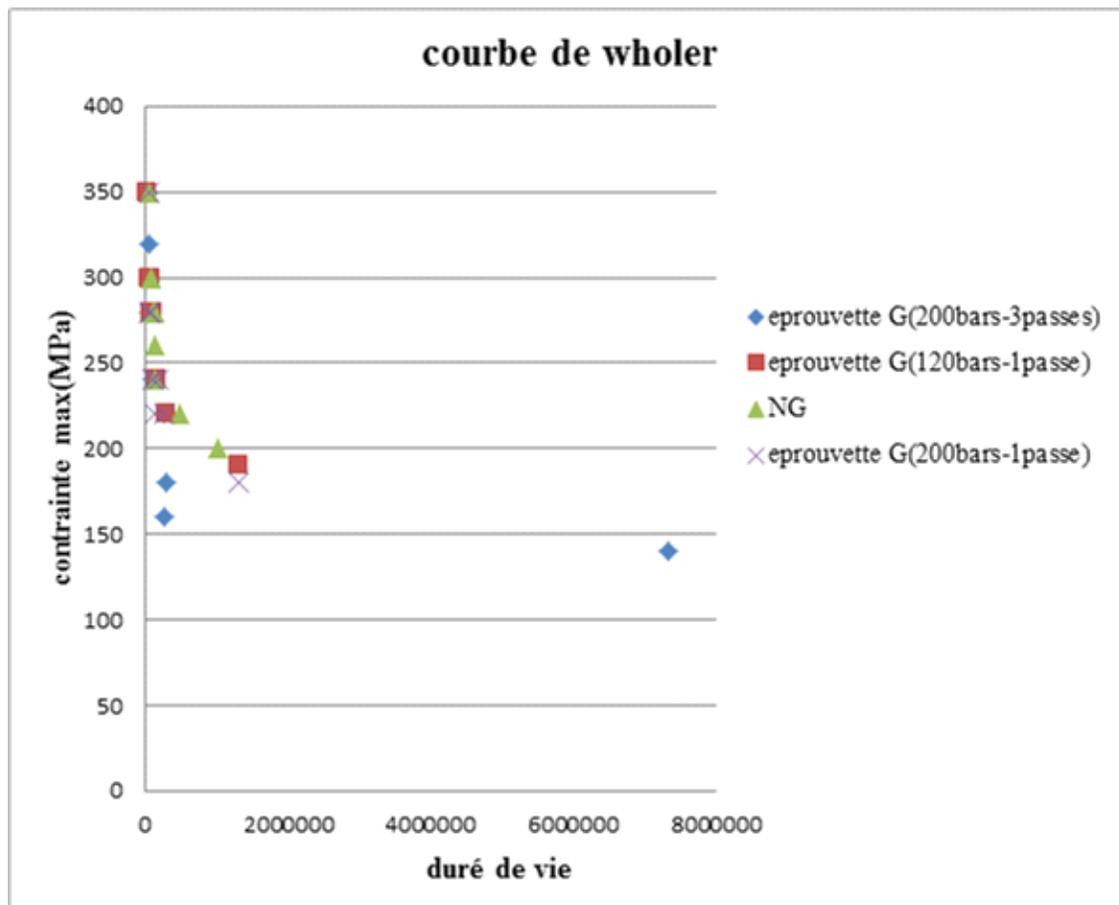
Ces essais de fatigue ont été réalisés à l'aérospatiale de Saint NAZAIRE sur des machines d'essai de type : INSTRON 8502 dans les conditions suivantes :

- Capacité de la machine : 10 tonnes
- Sollicitation : Traction sinusoïdale ondulée
- Rapport de charge : $R = 0,1$

- Fréquence de chargement : $f = 30\text{Hz}$
- Température d'essai : ambiante.

Ces essais ont pour objectif d'une part de tracer des courbes de WOHLER dont les résultats seront centrés autour de 10^5 cycles [116] qui représentent la durée de vie des constructions aéronautiques et d'autre part d'analyser la fractographie des fronts de rupture.

Les résultats des courbes de WOHLER des éprouvettes "TG" sont donnés sur la (figure 5) pour les éprouvettes épaisses.



IV.4. TABLEAUX RECAPITULATIFS DES ESSAIS DE FATIGUE

IV. 1. Éprouvettes épaisses, type TG-12 mm

Rep. Eprov.	Contrainte σ_{\max} (MPa)	Durée de vie N (cycles)	Rupture		Taille du front A rupture		Evolution du front a/c
			Oui	Non	a (mm)	c (mm)	
TG1-9	200	1 000 000		X	-	-	-
TG1-1	220	485 545	X		-	9,68	-
TG1-8	240	115 226	X		8,90	7,63	1,20
TG1-2	260	131 277	X		-	-	-
TG1-5	280	123 264	X		6,78	5,85	1,16
TG1-6	280	97 058	X		10,18	6,89	1,48
TG1-3	300	78 608	X		10,44	6,37	1,64
TG1-7	300	65 845	X		9,66	6,88	1,41
TG1-4	350	42 254	X		7,04	5,61	1,26

Rep. Eprov.	Contrainte σ_{\max} (MPa)	Durée de vie N (cycles)	Rupture		Taille du front A rupture		Evolution du front a/c
			Oui	Non	a (mm)	c (mm)	
TG1-19	190	1 300 000		X	-	-	-
TG1-18	220	297 950	X		11,48	9,93	1,16
TG1-17	240	154 576	X		10,18	8,66	1,18
TG1-11	240	168 017	X		9,92	9,68	1,02
TG1-12	280	97 333	X		8,35	7,64	1,09
TG1-15	280	75 135	X		8,61	8,91	0,97
TG1-16	300	65 421	X		8,08	6,90	1,17

TG1-14	300	56 970	X		8,60	6,87	1,25
TG1-13	350	29 055	X		7,04	5,61	1,25

Rep. Eprouv.	Contrainte σ_{\max} (MPa)	Durée de vie N (cycles)	Rupture		Taille du front A rupture		Evolution du front a/c
			Oui	Non	a (mm)	c (mm)	
TG1-21	180	1 300 000		X	-	-	-
TG1-29	220	267 564	X		10,70	9,16	1,17
TG1-28	220	117 588	X		11,21	9,41	1,19
TG1-22	240	193 521	X		9,13	9,17	0,99
TG1-27	240	94 263	X		11,21	9,16	1,22
TG1-26	240	89 925	X		-	-	-
TG1-23	280	67 130	X		9,13	7,40	1,23
TG1-25	280	56 385	X		8,60	7,13	1,20
TG1-24	350	34 929	X		7,04	5,35	1,31

Rep.	Contrainte	Durée de vie	Rupture	Taille du front	Evolution
------	------------	--------------	---------	-----------------	-----------

Eprouv.	σ_{\max} (MPa)	N (cycles)	A rupture		du front		
			Oui	Non	a (mm)	c (mm)	a/c
TG1-39	140	7 343 034		X	-	-	-
TG1-38	160	271 763	X		11,48	10,19	1,12
TG1-37	180	297 635	X		11,22	8,91	1,25
TG1-35	240	96 521	X		7,30	7,89	0,92
TG1-33	240	98 295	X		9,66	8,66	1,11
TG1-34	280	62 389	X		7,38	7,39	0,99
TG1-32	280	59 278	X		9,91	7,63	1,29
TG1-36	320	42 905	X		7,57	6,62	1,14
TG1-31	350	37 215	X		7,04	6,10	1,15

CONCLUSION GENERALE

Les TMS sont des procédés qui mettent en œuvre une déformation plastique des couches superficielles, de cette déformation résulte un bel aspect de surface caractérisé par une réduction de la rugosité, une amélioration de la qualité technologique et l'introduction des contraintes résiduelles de compression. Ces améliorations contribuent à améliorer la résistance à la traction par phénomène d'écrouissage et augmenter la tenue en fatigue par effets de fermetures.

Dans ce contexte, notre travail est scindé en deux parties.

Dans la première partie nous avons étudié les principales propriétés mécaniques de l'acier N80 après son traitement par brunissage à la bille. Il ressort de cette étude les conclusions suivantes :

A l'état du brunissage, les courbes de traction ont paradoxalement une chute de la limite élastique et la résistance à la rupture. Il est donc question de juger que le brunissage n'a pas induit un écrouissage du matériau à cause probablement de l'insuffisance des principaux paramètres. Ou alors que le matériau n'est pas apte à transformer cette déformation et par contre le matériau a subi un adoucissement puisque les essais de dureté ont montré une valeur constante de cette caractéristique avant et après usinage (brunissage).

Dans la deuxième partie relative à la question du galetage de l'Al 2024 T351.

Nous avons traité les résultats des essais industrielle effectués sur des éprouvettes traitées par un galetage partiel ceci étant fait délibérément pour être représentatif des structures aéronautique.

Le travail consiste à calculer le facteur d'intensité de contrainte en surface et en profondeur pour des fissurés de fatigue se propageant en 2D.

Les formulations de Newman sont jugées plus complètes pour le calcul du FIC puisqu'elles tiennent comptes de plusieurs corrections.

Il a été aussi jugées utile de voir l'influence de deux paramètres fondamentaux (pression et nombre de passe) sur la ténacité ($K_{I(a)}$ et $K_{I(c)}$). Par ailleurs nous avons pus tracer les courbes de Wöhler pour les différentes conditions de galetage.

La conclusion principale à cette seconde partie est principale de dire que dans les conditions ou il est appliqué, le galetage s'est montre sans effet remarquable à la tenue en fatigue et à la ténacité du matériau.

Ainsi une perspective est ouverte sur une étude locale au niveau des 2 phases principales de la fissuration à savoir l'amorçage et la propagation des fissures pour rechercher la phase ou le procédé est le plus bénéfique

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[21]Loh N.H., Tam S.C., Miyazawa S., Surface hardening by ball burnishing, Proc. Engng., Vol. 23, N°6, pp. 413-417, 1990.

[9]Brand A., Flavenot J.F., Gregoire R., Tournier C., Recueil de données technologiques sur la fatigue, CETIM, 1980

[22]El-Axir M.H., An investigation into roller burnishing, Int. J. Mach. Tools Manufact. N° 40, pp. 1603-1617, 2003.

[6]<http://www.cogsdill.com>, Outils et machines à galetage, Cogsdill-Nuneaton tool products, INC. Tenlons road, Nuneaton, England (2004).

[8]Hamadache H., Laouar L., Chaoui K., Characteristics of Rb 40 steel superficial layer under ball land roller burnishing Journal of materials processing technology, (2006).

[17]Lemercier M., Emploi rationnel du galetage, Bulletin CT de l'industrie du décolletage N°41, pp. 5-18, 1976.

[19]Klocke F., Lierman J., Roller burnishing of hard turned surfaces, Int. J. Mach. Tools Manufact. N° 38, pp. 419-423, 1998.

[20]Bravslavski V.M., Baraz A.A., Deformation strengthening of machinery parts, Soviet. Engineering. Research, Vol.3, N° 7, pp. 46-49, Juil.1983.

[18]Mendar A.C.E., La technique du galetage, Métaux et déformation, N°47, Avril1978.

[23]Shiou F.J., Chen C.H., Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process, Journal of materials processing technology, pp. 248-254, 2003.

[24]Hassan A.M., Al-Jalil H.F., Ebied A.A., Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components, Journal of materials processing technology, pp. 176-179, 1998.

[16]Hugot J.F., Roux C., Influence du galetage sur la tenue en fatigue Rapport de l'aérospatiale Nov.1992.

[14]Patrie J., Traitement anodique des métaux, Sciences de l'ingénieur, pp. 1-14, 2000.

[15]Hamadache H., Chaoui K., Effet d'un Galetage Partiel combiné à l'O.A.C sur les fronts de rupture dans un alliage Al 2024 1^e Séminaire de la Maintenance Industrielle, Souk-Ahras, 18-19 Mai, 2004.

[116]Hamadache H., Royer J., Clerivet A., Influence du galetage sur la tenue en fatigue d'un alliage d'aluminium Al 2024 T351, colloque des doctorants, E.C. Paris 1992.

[56]Newman J.C., Raju I.S., Stress intensity factor equation for cracks in 3D finites bodies subjected to tension and bending loads, NASA, Technical Memorandum 85793, April 1984.