

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierat.

Département : Génie Mécanique.

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

### Thème:

Analyse statistique des effets des paramètres de galetage sur la tenue en fatigue de l'A1 2024T351

Présenté par : *Benhaoues Fatma zohra*

Encadrant : *Hamadache Hamid* Grade Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

### Jury de Soutenance :

Khelif Rabia	Pr.	UBMAnnaba	Président
Hamadache Hamid	Pr.	UBMAnnaba	Encadrant
Kallouch Abdelkader	MCB	UBMAnnaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, l'intelligence et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont toujours encouragés dans la poursuite de mes études, ainsi que pour leur aide, leur compréhension et leur soutien.

Et aussi je tiens à exprimer ma reconnaissance à Pr *Hamadache Hamid* pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude. Je le remercie pour son implication, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes études.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire.

## Résumé

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique.

Toute pièce mécanique en fonctionnement normal est soumise à un certain nombre de sollicitations d'origines diverses, de valeurs maximales généralement connues mais variables dans le temps - modestes par rapport aux caractéristiques mécaniques du matériau utilisé. La répétition de ces efforts mène la pièce ou la structure à la rupture, ce qui est appelé phénomène de fatigue.

Le galetage est un procédé par déformation plastique superficielle permettant ainsi un traitement mécanique par formage à froid des surfaces des pièces mécaniques, il a été utilisé progressivement comme une opération de finition qui donne des avantages supplémentaires tels que l'augmentation de la dureté de surface, la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure et la génération des contraintes résiduelles de compression.

Ce travail porte sur l'étude d'un galetage partiel conduit avec deux principaux paramètres en l'occurrence le nombre de passe et la pression sur la durée de vie d'un alliage d'Al 2024. Les résultats ont montré que dans les conditions d'application de ce traitement, le procédé de TMS n'a pas montré ses effets bénéfiques vis-à-vis l'endurance à  $10^5$  cycles et la ténacité ( $K_{IC}$ ) du matériau. Cependant une analyse statistique a montré que la pression est le facteur le significatif sur les deux réponses de sortie.

Par l'application d'un plan d'expérience factoriel complet type  $2^2$  basé sur une étude statistique, il a été déterminé un modèle mathématique qui permet de prédire soit l'endurance soit la ténacité. En fonction des paramètres du galetage envisagés dans cette étude.

**Mot clés.** Matériau, Aluminium, galetage, la fatigue, **ténacité** Analyse statistique

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Représentation schématique d'une dislocation : a) Dislocation coin, b) Dislocation vis.....	p 4
<b>Figure I.2.</b> Représentation schématique d'une maille a) cc, b) cfc et c) Hc .....	p 5
<b>Figure I.3.</b> Différentes opérations en fraisage industrielles a) formes obtenues, b) différentes opérations 1. Surfaçage de face, 2. Surfaçage de profil, 3. Surfaçage - dressage prédominant profil, 4. Rainurage 3 tailles, 5. Rainurage 2 tailles, 6. Surfaçage - dressage prédominant face.....	p 7
<b>Figure I.4.</b> cycle de fatigue.....	p10
<b>Figure I.5.</b> Courbe d'endurance.....	p11
<b>Figure I.6.</b> Principe de galetage.....	p14
<b>Figure I.7</b> Exemple d'outil de TMS a) brunissage b) Galetage.....	p15
<b>Figure I.8.</b> Schéma de l'expérimentation.....	p18
<b>Figure I.9.</b> Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	p18
<b>Figure I.10.</b> Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.....	p19
<b>Figure I.11.</b> Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.....	p19
<b>Figure I.12.</b> Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	p20
<b>Figure I.13.</b> Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.....	p20
<b>Figure II.1</b> Eprouvette de fatigue en AL2024T.....	p26
<b>Figure II.2</b> Courbes de Wöhler sous diverses conditions de galetage.....	p27
<b>Figure II.3 :</b> courbe de contour de l'effet des paramètres du galetage sur l'endurance.....	p 31
<b>Figure II.4 :</b> courbe de contour de l'effet des paramètres du galetage sur la ténacité .....	p31
<b>Figure II.5 :</b> Influence des paramètres du galetage sur l'endurance.....	p32
<b>Figure II.6 :</b> Influence des paramètres du galetage sur la ténacité.....	p32
<b>Figure II.7 :</b> Diagramme des interactions pour l'endurance $\sigma_D$ .....	p33
<b>Figure II.8 :</b> Diagramme des interactions pour ténacité $K_{Ic}$ .....	p33

<b>Figure II.9</b> : interaction de l'effet des paramètres du galetage sur l'endurance.....	p34
<b>Figure II.10</b> : interaction de l'effet des paramètres du galetage sur la ténacité.....	p34
<b>Figure II.11</b> : Influence de galetage et OAC sur endurance.....	p35

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Matrice de plan d'expérience.....	p23
<b>Tableau II.1</b> : composition chimique de l'alliage Al 2024 T351.....	p26
<b>Tableau II.2</b> Endurance a $10^5$ cycles et ténacité ( $K_{Ic}$ ).....	p28
<b>Tableau II.3</b> : Facteurs codés.....	p 28
<b>Tableau II.4</b> : Plan d'expériences pour le galetage .....	p 28
<b>Tableau II.5</b> : Les réponses mesurées après traitement de galetage et OAC.....	p 29
<b>Tableau II.6</b> : Valeurs des coefficients polynôme.....	p 30

## Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
Introduction .....	1
 <b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	p3
<b>I.2 Les matériaux cristallins</b> .....	p3
<b>I.3 Le cristal réel</b> .....	p3
I.3.1 Défaut ponctuel .....	p3
I.3.2 Défauts linéaires .....	p4
I.3.3 Défauts plans.....	p4
I.3.4 Défauts à trois dimensions .....	p4
<b>I.4 Réseau cristallin</b> .....	p5
I.5 Mise en œuvre des matériaux .....	p5
I.5.1 Sans enlèvements de matière .....	p5
I.5.2 Avec enlèvement de matière .....	p6
<b>I.6 Propriétés mécaniques des métaux</b> .....	p7
I.6.1 Résistance mécanique .....	p8
I.6.2 Rigidité .....	p8
I.6.3 Ductilité.....	p8
I.6.4 Ténacité.....	p8
I.6.5 Phénomène de fatigue .....	p9
<b>I.7 Traitement de surface</b> .....	p11
I.7.1 Traitement thermique .....	p11
I.7.2 Traitement chimique.....	p12
I.7.3 Traitement mécanique de surface .....	p13
<b>I.8 Le galetage</b> .....	p14
I.8.1 Définition .....	p14
I.8.2 Principe de galetage .....	p14
I.8.3 Différents types de galetage.....	p15
I.8.4 Paramètres de galetage .....	p15
I.8.5 Effet du galetage .....	p16

I.8.6 Avantages du galetage .....	p16
<b>I.9 La lubrification .....</b>	<b>p16</b>
<b>I.10 Les plans d'expériences.....</b>	<b>p17</b>
<b>I.11 Conclusion .....</b>	<b>p24</b>

## **Chapitre II : Technique et résultats expérimentaux**

II.1 introduction .....	p26
II.2 Matériau .....	p26
II.3 caractérisation des Matériaux .....	p26
II.4 Opération de galetage.....	p27
II.5. Plan D'expérience .....	p28
II.6. Modèle des plans factoriels .....	p29
II.7. Les réponses avec les facteurs codées .....	p30
II.8. Etude des interactions entre P et i .....	p32
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>p36</b>
<b>Référence bibliographique .....</b>	<b>p37</b>



## Introduction générale

Le matériau est un élément très essentiel dans la vie quotidienne. Le développement de la technologie a été influencé par le choix de matériaux dans tous les domaines.

La science des matériaux a été développée pour améliorer les caractéristiques des matériaux, dont les métaux, les polymères, les céramiques. Elle est par essence pluridisciplinaire : physique, chimie, physico-chimie, mécanique. Elle est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques : en génie mécanique, électronique, nanosciences, nanotechnologies...

Aujourd'hui, pour élever les spécificités du matériau, les industries mécaniques ont recours à l'intégration de plusieurs procédés de type TMS au sein de la gamme d'usinage appelés déformation élastique ductiles à la surface DPS, ce qui se traduit par l'amélioration des couches superficielles en améliorant la rugosité, le durcissement élastique et l'incorporation de contraintes résiduelles. Tous ces bénéfices sont souvent liés aux éléments du procédé tel que P, i, v, f l'état physico géométrique initiale de la couche superficielle.

L'aluminium se retrouve aujourd'hui, sous forme d'alliages, **dans de très nombreuses applications industrielles**. À la vue de tous, ou de manière transparente, l'aluminium est omniprésent et contribue à notre mode de vie moderne.

Le traitement sur l'Aluminium est notamment utilisé pour les vis, les pièces mécaniques pour les machines spéciales, la serrurerie, l'armement, l'outillage des pièces de décolletage. Grâce à ses propriétés incomparables aérospace.

Les traitements de surface mécaniques sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de **durcissement superficiel**, de **modification structurale** et d'**introduction de contraintes résiduelles de compression** grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des composants mécaniques

Une question principale : alors à laquelle nous nous intéresserons est : quel est l'influence des paramètres du galetage sur la tenue en fatigue de l'AL 2024T ?

# **chapitre I :**

# **Etude bibliographique**

**I.1 Introduction**

Toutes les machines, tous les objets (naturels ou artificiels) qui nous entourent et/ou que nous utilisons dans tous les domaines sont fabriqués à partir des matières ou des produits d'origines naturelles ou aussi artificielles. Donc un matériau (liquide, solide ou gaz) est, par simple définition, tout produit utilisé pour la fabrication d'un objet.

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

**I.2 Les matériaux cristallins**

A l'échelle microscopiques ; les matériaux cristallins présentent une structure hautement organisée et leurs composantes moléculaires sont solidement entassées. Ces zones de cristallinité sont appelées sphérolites et elles peuvent varier dans la forme et la dimension à travers les zones amorphes [1]. Les matériaux cristallins sont des agrégats d'une multitude de cristaux parfois très petits (de quelques microns à quelques centaines de microns). Dans ces polycristaux, le caractère ordonné de la matière, présente à l'échelle de chaque cristal, n'apparaît plus au niveau macroscopique. Les métaux et les alliages métalliques relèvent de cette description, de même que les céramiques et certains polymères partiellement cristallins. Dans le cas des métaux, les cristaux de l'agrégat sont appelés grains et les frontières entre ces cristaux joints de grains [2].

**I.3 Le cristal réel**

Les matériaux utilisés dans l'industrie ne sont parfaits. Ainsi un cristal comporte des défauts (défauts de réseau) même s'ils sont peu nombreux. Ces défauts ont une importance considérable puisqu'ils déterminent un grand nombre de propriétés importantes des solides cristallins, telles que les propriétés plastiques.

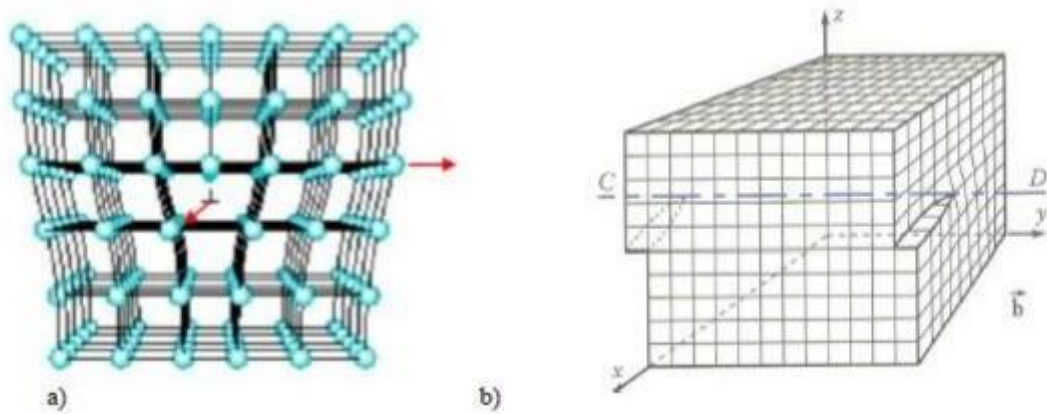
Il existe quatre sortes de défauts cristallins : défauts ponctuels, défauts linéaires, défauts plans et défauts à trois dimensions.

**I.3.1 Défaut ponctuel**

Un défaut ponctuel entraîne un défaut autour d'un point, mais les voisins sont également perturbés. Introduire un atome, c'est introduire une force. Ces défauts ponctuels entraînent donc des défauts autour d'un point.

### I.3.2 Défauts linéaires

Les défauts linéaires concernés ici sont appelés dislocation. Il en existe de deux types : la dislocation coin et la dislocation vis [2].



**Figure I.1.** Représentation schématique d'une dislocation : a) Dislocation coin, b) Dislocation vis

**a) Une dislocation coin** est représentée à la figure I.1.a, dans une structure cubique simple. Une telle dislocation est la ligne sur laquelle se termine un demi-plan atomique supplémentaire à l'intérieur du cristal. On peut remarquer sur cette figure que le cristal est déformé au voisinage de la dislocation : au-dessus de la ligne de dislocation AB, la distance entre les atomes étant moins grande que leur distance d'équilibre, le réseau est en compression ; la situation inverse prévaut sous la dislocation : le réseau y est en tension.

**b) Une dislocation vis** représentée à la figure I.1.b, est le résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation.

### I.3.3 Défauts plans

Les défauts à deux dimensions comprennent les joints de grains, (les joints de) macles, les sous-joints et les parois d'antiphase. Nous ne verrons que les joints de grains et les macles.

### I.3.4 Défauts à trois dimensions

On a un défaut à trois dimensions quand une partie du cristal est remplacée par un volume d'un composé différent ; la différence est de nature chimique et peut ou non être accompagnée de différences cristallographiques. La partie étrangère du cristal est soit un précipité, soit une inclusion [2].



**La Déformation plastique :** Lorsque que l'on sollicite une pièce, un objet (on le tire, on le comprime, on le tord...), celui-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. Certains matériaux, dits " fragiles ", cassent dans ce mode de déformation si la sollicitation est trop forte.

Pour les matériaux dits " ductiles ", lorsque l'on augmente la sollicitation, on déforme de manière définitive la pièce ; lorsque l'on arrête la sollicitation, la pièce reste déformée. [6]. 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, il acquière en contrepartie en surface, de nouvelles propriétés mécaniques et topographiques [7].

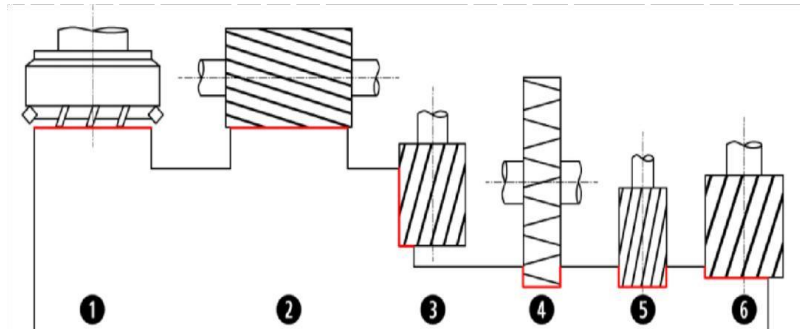
### **I.5.2 Avec enlèvement de matière**

Pour se conformer aux exigences techniques (état de surface, tolérance...) imposées aux pièces mécaniques, on recourt à la mise en œuvre par enlèvement de copeaux. On distingue deux grandes familles.

#### **I.5.2.1 Usinages conventionnels**

L'usinage s'effectue dans le but de donner aux pièces brutes la forme la dimension et la précision nécessaire demandée par le concepteur dans son dessin, par enlèvement de copeau (surépaisseur) sur des machines-outils appropriées.

Il existe plusieurs types d'usinage tels que : tournage ; fraisage ; rectification.... Ces types d'usinage exigent un système Mo. D. O.P (machines-outils, Dispositif, Outils et Pièce) avec une cinématique outil/pièce de trois mouvements principaux : mouvement coupe (Mc), mouvement avance (Ma), et mouvement pénétration (Mp) [8]. A titre d'exemple (fig I.3) montre un exemple d'usinage par fraisage et les différentes formes qu'on peut obtenir.



**Figure I.3.** Différentes opérations en fraisage industrielles a) formes obtenues, b) différentes opérations 1.

Surfaçage de face, 2. Surfaçage de profil, 3. Surfaçage - dressage prédominant profil, 4. Rainurage 3 tailles, 5. Rainurage 2 tailles, 6. Surfaçage - dressage prédominant face.

### I.5.2.2 Usinages non conventionnels

L'appellation procédés non conventionnels est utilisée pour désigner un ensemble de techniques de production relativement récente. L'emploi a été rendu nécessaire par l'usage croissant de matériaux à caractéristiques mécaniques élevées pour lesquels les procédés conventionnels étaient limités.

Les procédés non conventionnels sont les techniques d'usinage autres que la coupe et la rectification pour lesquelles l'énergie est fournie différemment, par un mode autre qu'une action mécanique transmise par un contact direct et effort entre un outil et la pièce.

Les procédés non-conventionnels utilisent le courant électrique, la lumière amplifiée, des gaz, des abrasifs libres, des solutions chimiques, ou même l'eau comme moyens d'usinage plutôt qu'un outil de coupe ou d'abrasion conventionnel. Parmi ces procédés nous distinguons [9] :

- L'usinage électrochimique.
- Usinage abrasif par ultrasons.
- Découpe laser.
- Electroérosion.

### I.6 Propriétés mécaniques des métaux

Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité. Elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints.

Le matériau qui a un réseau cubique à faces centrées le plus ductile et le plus tenace par rapport le matériau qui a un réseau cubique centrée.

**I.6.1 Résistance mécanique**

C'est la capacité d'une structure de résister aux efforts mécaniques extérieurs, le plus souvent cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « $\sigma_r$ » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique [10, 11].

**I.6.2 Rigidité**

Cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes. Elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de HOOK est valable. Elle est mesurée suite à un essai de traction [12,13].

**I.6.3 Ductilité**

La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. L'origine de la ductilité d'un matériau est la mise en mouvement des dislocations dont il est le siège.

La ductilité est une propriété conditionnée par la malléabilité. « La malléabilité est le premier indice de la ductilité ; mais elle ne nous donne néanmoins qu'une notion assez imparfaite du point auquel la ductilité peut s'étendre. »

La ductilité désigne surtout la capacité d'une matière à résister à l'étirement [14].

**I.6.4 Ténacité**

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

Elle est caractérisé par le champ d'action mécanique de la rupture (prend en compte la présence de défauts) et apparait lorsque l'on rappelle que la rupture est un mode de défaillance gouverné par la fissuration (créée, amorcée, propagée).



### I.6.4.1 Principe de la ténacité

Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-fissurée. En exerçant sur cette éprouvette un système de forces appropriées, on soumet généralement sa fissure à un mode d'ouverture (Mode I, le plus pénalisant) et on évalue l'énergie élastique libérée par la progression de la fissure.

Suivant le niveau de ductilité du matériau, le comportement à la rupture est analysé à l'aide des concepts de la mécanique linéaire élastique de la rupture (MELR) et de la mécanique élastoplastique de la rupture (MNLR).

- La résistance à la fissuration est représentée par :
  - le taux critique de restitution d'énergie ( $G_c$ ) ou  $K_{Ic}$  : le facteur d'intensité de contrainte de la MELR
  - La courbe R de la MNLR qui donne en fait la variation de la ténacité ( $G, K, J$ ) en fonction de l'avancée de fissure ( $a$ )
- Comprendre voire éviter, les ruptures en utilisant des critères de conception adéquats revient ainsi à analyser finement les caractéristiques d'amorçage et de propagation de fissures des matériaux en traction, flexion, choc ou fatigue [15].

### I.6.5 Phénomène de fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces [16].

La fatigue des matériaux est la détérioration progressive des matériaux sans déformation apparente, aboutissant à une rupture. La fatigue d'un matériau résulte de l'application répétée de contraintes. La rupture par fatigue apparaît de façon soudaine et imprévisible, contrairement à l'usure, à la déformation ou à la corrosion, qu'il est possible de détecter bien avant la rupture. L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante ; elle permet de déterminer la résistance mécanique d'éléments de machines et de structures soumises à des contraintes périodiques ou à des vibrations [17].

#### I.6.5.1 Cycle de fatigue

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle ( $\bar{\sigma}_a$ ) par la valeur moyenne de la contrainte ( $\bar{\sigma}_m$ ), et par le rapport ( $R$ ) de la contrainte minimale à la contrainte maximale : On est parfois conduit à distinguer la composante alternative  $\bar{\sigma}_a$  de la composante statique  $\bar{\sigma}_m$ . Un cycle de fatigue est caractérisé par (Fig. I.4).

-Le rapport de contrainte  $R_e$ :

$$R_e = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

-La contrainte moyenne:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

-L'amplitude de la contrainte ( $\bar{\sigma}_a$ ):

$$\bar{\sigma}_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

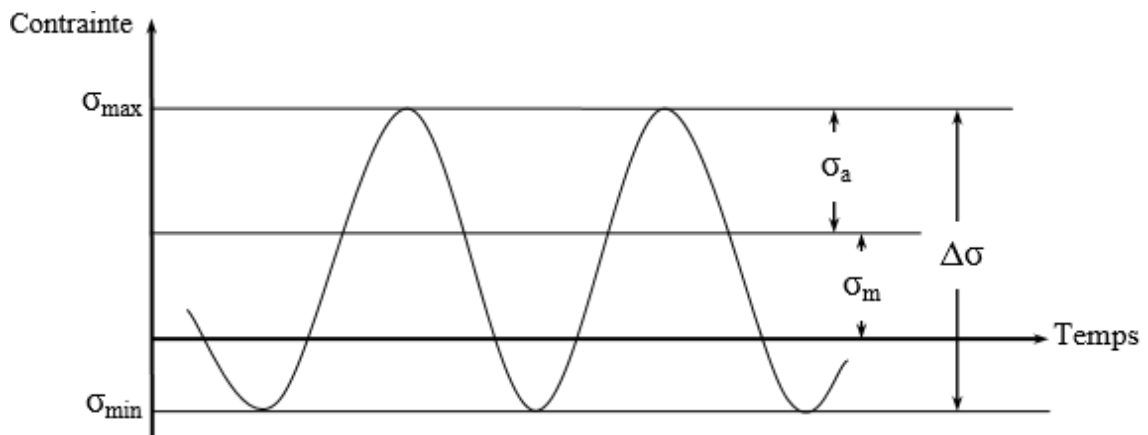


Figure I.4. Cycle de fatigue

On distingue différents cycles de fatigue :

- Alternée symétrique :  $\bar{\sigma}_m = 0$  ,  $R = -1$
- Alternée dissymétrique :  $0 < \bar{\sigma}_m < \bar{\sigma}_a$  ,  $-1 < R < 0$
- Répétée :  $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_a$  ,  $R = 0$
- Ondulée :  $\bar{\sigma}_m > \bar{\sigma}_a$  ,  $0 < R < 1$

### I.6.5.2 L'endurance

On appelle endurance, la capacité de résistance à la fatigue des pièces que l'on étudie.

-la figure I.5 montre le diagramme d'endurance ou courbe de Wöhler qui montre l'amplitude de contrainte appliquée/nombre de cycles à rupture [18].

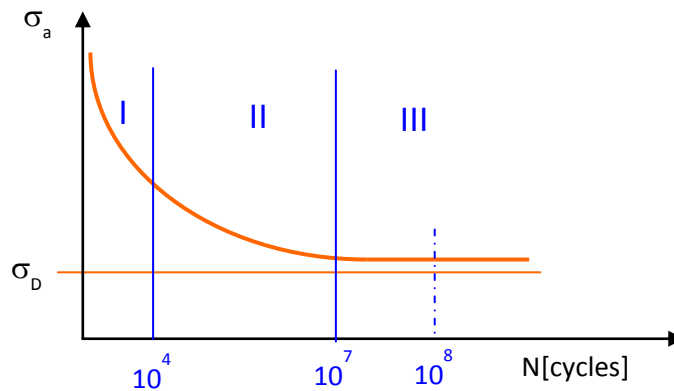


Figure I.5. Courbe de wohler

On distingue 3 zones

-La zone I de fatigue oligocyclique : Cette zone est caractérisée par une forte amplitude de contraintes et une durée de vie réduite ( $N_r < 10^4$  cycles).

-La zone II d'endurance limitée : La rupture se produit après un grand nombre de cycles quand la contrainte diminue ( $10^4 < N < 10^6$  à  $10^8$ ). Cette zone est la plus habituellement considérée. La rupture intervient sans aucune déformation plastique globale de la pièce.

-La zone III d'endurance illimitée : Sous de faibles amplitudes de contraintes sa, la rupture ne se produit pas même après un grand nombre de cycles ( $N > 10^7$  cycles).

## I.7 Traitement de surface

Les traitements de surface ont pour effet de modifier l'apparence d'une surface (décoration, amélioration de l'aspect), ses propriétés physiques ou/et chimique, afin d'apporter : une tenue à la corrosion, à l'usure, une amélioration du frottement, une résistance à l'oxydation à chaud, favoriser la soudabilité, la conductibilité électrique, modifier les propriétés optiques, assurer un effet de barrière thermique ou d'isolation aux rayonnements ou encore de préparer et favoriser l'application d'un autre traitement de surface.

### I.7.1 Traitement thermique

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a). D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture ( $R_m$ ), de la limite élastique,  $R_e$ , et l'allongement  $A$  % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. b). De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c). De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage) [19].

Les traitements thermiques superficiels des pièces en alliages ferreux sont destinés à améliorer leur résistance à la fatigue ou (et) à l'usure en durcissant les zones critiques superficielles par des apports thermiques suffisamment brefs et localisés pour confiner les effets structuraux

Les principaux traitements thermiques sont :

**La trempe** ou trempage est un traitement thermique consistant à chauffer un matériau constitué d'une phase  $\alpha$  au-dessus d'un point de transformation (transformation métallurgique par exemple) en vue d'obtenir une nouvelle phase  $\beta$  puis de le refroidir selon une vitesse appropriée produisant une phase  $\alpha$  hors équilibre. Ce traitement est majoritairement appliqué à des métaux, mais des verres sont obtenus par ce type de traitement.

La trempe structurale des alliages d'aluminium a des buts et des effets totalement différents de la trempe martensitique des aciers. Le cycle thermique de ce traitement comprend : - Le chauffage jusqu'à la température de dissolution totale ou partielle des phases intermétalliques en excès dans l'aluminium. - Le maintien à cette température. - Le refroidissement suffisamment rapide (hypertrempe) jusqu'à la température ambiante pour obtenir un solide sursaturé. - Le maintien isotherme ultérieur qui conduit au durcissement de l'alliage. Celui-ci est réalisé, soit à la température ambiante (vieillessement naturel ou maturation), soit à une température supérieure (appelé vieillissement artificiel ou simplement vieillissement)[20].

Le **revenu** est un processus de traitement thermique à basse température (inférieure à A1), normalement effectué après le durcissement sous atmosphère neutre, la double trempe, la cémentation atmosphérique, la carbonituration ou le durcissement par induction, afin de parvenir au rapport dureté / solidité souhaité [21].

### **I.7.2 Traitement chimique**

Ils sont utilisés pour former des cavités dans les plaques et les feuilles, et comme une alternative à un cisaillement mécanique. Ont des taux d'élimination typiques sont de  $0,15 \div 6$  mm/h et les réactifs sont l'hydroxyde de sodium (Pour l'aluminium) et acide chlorhydrique et nitrique (pour acier).

Il s'agit d'une dissolution contrôlé avec formation de dépôts de sels insolubles qui réduisent le

risque de corrosion et améliorent l'adhésion de revêtement organiques. Pendant le processus, des dépôts jaune pâle à marron foncé se forment sur la surface. La coloration des dépôts, due à l'interférence lumineuse dans le revêtement mi-transparent, permet d'évaluer son épaisseur. Plus le revêtement a foncé, plus il est épais et meilleure est la protection [22].

### **I.7.2.1 L'anodisation chromique**

L'anodisation chromique est généralement mise en œuvre dans un bain contenant 30 à 50 g/l d'anhydride chromique ( $\text{CrO}_3$ ), à une température de 40 à 50°C. Le processus s'effectue suivant des cycles de tension comme le cycle Bengough-Stuart [23]. L'anodisation chromique forme des couches très minces, 2 à 5  $\mu\text{m}$ , avec un gonflement équivalent à 33% de l'épaisseur du film. Ce traitement convient donc pour des pièces dont les tolérances dimensionnelles sont très serrées. Elle est très utilisée dans l'industrie aéronautique pour ses propriétés anti corrosion intrinsèques, son aptitude à l'adhérence des films de peinture, son influence modérée sur les caractéristiques de fatigue et la révélation de la structure métallurgique de l'alliage sous-jacent : grain, fibrage, hétérogénéité liées au traitement thermique (trempe hétérogène) ou à l'usinage (brûlure). Moyennant une gamme appropriée, elle permet de détecter des défauts ressortant. Elle présente également l'avantage de ne pas attaquer le métal en cas de rétention de produit sur des pièces de géométrie complexe, assemblées ou moulées. L'oxyde peut être colmaté afin d'augmenter la tenue à la corrosion. Sans colmatage, il constitue une bonne base d'accrochage des peintures et des adhésifs, mais présente une résistance intrinsèque à la corrosion faible. Il existe un procédé de « colmatage optimisé » qui permet d'obtenir une bonne tenue à la corrosion et une bonne adhérence des systèmes de peinture. La coloration de la couche d'oxyde est possible mais se limite le plus souvent à la teinte noire.

## **I.7.3 Traitement mécanique de surface**

### **I.7.3.1 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. 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 [24].

## I.8 Le galetage

### I.8.1 Définition

Le galetage est un procédé de formage à froid par déformation plastique superficielle qui modifie les propriétés de base des couches superficielles du matériau qui a pour but de produire une déformation localisée en surface d'une pièce métallique. Il est répertorié dans la gamme des traitements mécaniques de surface. Il peut être mis en œuvre dans la configuration pièce tournante – outil fixe comme dans la configuration pièce fixe – outil tournant. La cinématique du procédé le rend cependant plus adapté à la mise en forme de pièces axisymétriques sur tour. Dans ce cas, il est possible de traiter aussi bien des arbres que des alésages [25].

### I.8.2 Principe de galetage

Le principe de ce procédé est basé sur l'application d'une pression sur les crêtes de la surface au moyen d'une bille, ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de la bille. Il permet de niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écrouie, indice d'une amélioration de l'état de surface. (fig I.6)

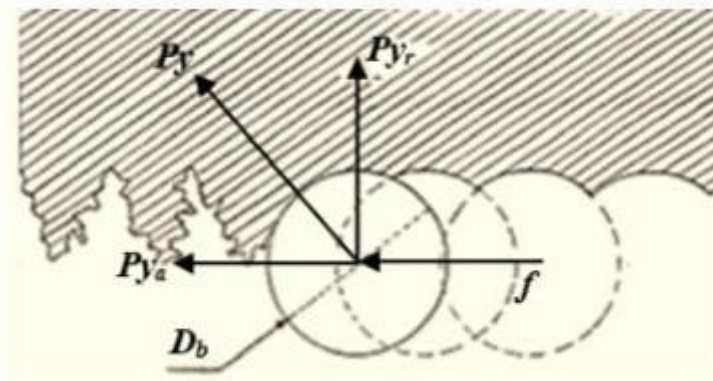


Figure I.6. Principe de galetage

Les effets bénéfiques du procédé sont conditionnés par l'aptitude des matériaux à subir une déformation plastique superficielle (D.P.S). Les alliages non ferreux, tel que les alliages

d'aluminium sont reconnus par leur bonne ductilité et s'apprêtent bien à l'action du brunissage et ont été à l'origine de plusieurs travaux [26].

### I.8.3 Différents types de galetage

On distingue les types de galetage suivants :

Galetage de renforcement : il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction

Galetage dimensionnel ou de forme : le but de ce galetage est modifier la forme initial de la pièce

Galetage de surface : avec ce galetage on peut améliorer la surface au niveau macro et micro géométrique et il est possible d'atteindre un niveau de super finition

### I.8.4 Paramètres de galetage

L'efficacité du traitement dépend de plusieurs paramètres [27], en l'occurrence

-La force

-La vitesse ainsi que le nombre de passes de l'outil de galetage (Fig. I.7) jouent un rôle important dans le procédé de galetage et ayant un effet considérable sur les paramètres d'état de la couche superficielle du matériau traité.



Figure I.7 Exemple d'outil de TMS a) brunissage b) Galetage

-La géométrie et les dimensions de l'outil,

-La rugosité de la surface antérieure,

-La nature du matériau à traiter,

- L'avance par rapport à la pièce,
- La géométrie et les dimensions de la pièce,
- Les contraintes résiduelles antérieures.

### **I.8.5 Effet du galetage**

- Le galetage est un processus de finition de surface qui peut être utilisé pour améliorer la rugosité de surface, Le coefficient de frottement et la résistance à l'usure et à la fatigue.
- En appliquant la force de galetage sur la surface, la déformation plastique se produira comme les pics se jettent dans les vallées. En même temps, des contraintes de compression sont induites dans la surface et cela provoque une augmentation de la dureté de surface, ce qui améliore la résistance à l'usure et à la fatigue.

La déformation plastique superficielles induit par les TMS (galetage), résulte un lissage du profil micro-géométrique de la surface et un durcissement par écrouissage des couches superficielle. De ces effets résultent des améliorations des caractéristiques mécaniques et technologiques de nombreux alliages métalliques.

Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelle qui vont influencer son comportement en fatigue, en corrosion. Le galetage fait partie d'une gamme de traitements mécaniques dont le rôle est d'introduire des contraintes résiduelle de compression. Grace à ce champ de contraintes résiduelles favorables pour décharger les couches superficielles d'une pièce mécanique, les performances sont nettement améliorées.

Comme dans les autres traitements de surface mécaniques, l'introduction des contraintes résiduelles de compression engendre une augmentation de la résistance à la fatigue [28].

### **I.8.6 Avantages du galetage**

Amélioration de l'état de surface Amélioration des Caractéristiques mécaniques

Outillage simple, durée de vie élevée, et peu couteux

Opération économique car le brunissage est appliqué sur des pièces non traitées

Il crée des précontraintes de compression qui agissent favorablement sur l'endurance

En générales les traitements mécaniques de surface se réalisent sous lubrification

### **I.9 La lubrification**

La lubrification est l'un des moyens les plus efficaces actuellement connus pour réduire le frottement et contrôler l'usure. Cette technique consiste à créer un film mince de liquide, gaz ou solide entre deux surfaces pour faciliter le mouvement, en réduisant le minimum d'énergie et



permettant de prévenir les endommagements possible. En plus, il est nécessaire que le milieu résistant inter-facial possède une épaisseur suffisante pour éviter tout contact entre les aspérités des surfaces frottantes quelles que soient les valeurs des charges appliquées. Dans ce cas lorsque la vitesse relative des surfaces est faible et que la viscosité du fluide inter-facial est insuffisante, il faut, pour éviter tout contact désastreux que :

- les déformations subies par les surfaces en regard sous l'effet de la charge appliquée soient aussi faibles que possible,
- la rugosité des surfaces en regard soit aussi faible que possible, Le lubrifiant doit remplir certaines conditions tels que:
  - la température d'ébullition soit assez élevée,
  - la faible affinité pour l'oxygène de l'air,
  - être passif vis à vis des surfaces frottantes de façon à assurer un long usage sans modification notable des propriétés,
  - adhérer aux surfaces de frottements (pouvoir mouillant).

Pratiquement, seules les huiles et graisses d'origine minérale remplissent suffisamment ces conditions pour pouvoir être utilisées comme lubrifiants [29].

### **I.10 Les plans d'expériences**

Les plans d'expériences consistent à sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier, à moindres coûts, les effets des paramètres sur la réponse du produit. Il s'agit de méthodes statistiques faisant appel à des notions mathématiques simples (Fig. I.8). La mise en œuvre de ces méthodes comporte trois étapes :

1. Postuler un modèle de comportement du système (avec des facteurs codés);
2. Définir un plan d'expériences, c'est-à-dire une série d'essais permettant d'identifier les coefficients du modèle ;
3. Faire les essais, identifier les coefficients et conclure.

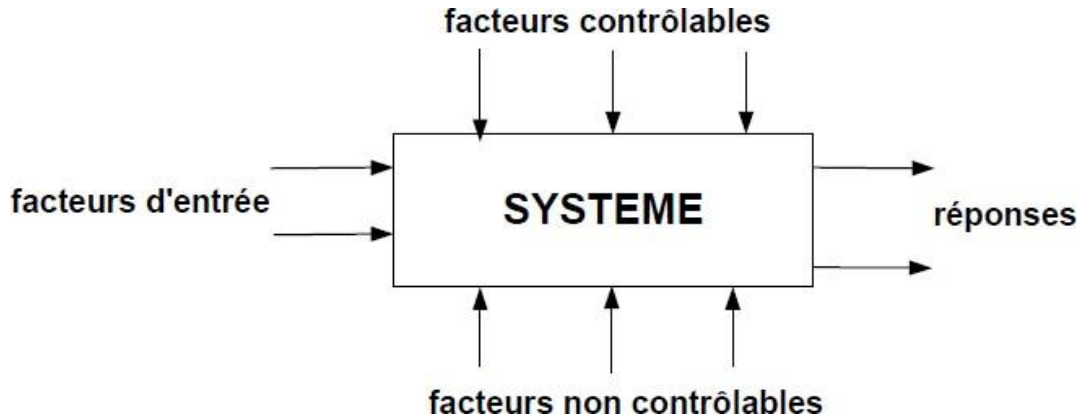
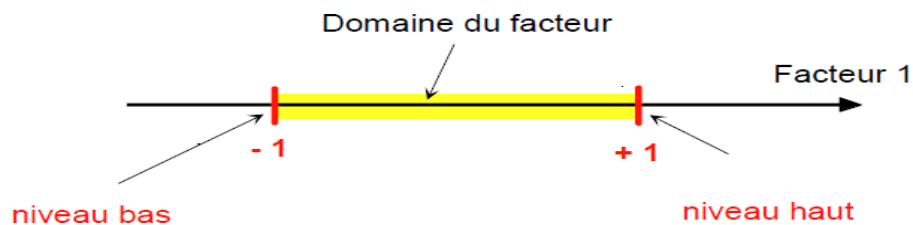


Figure I.8. Schéma de l'expérimentation

### I.10.1 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Fig I.9). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne

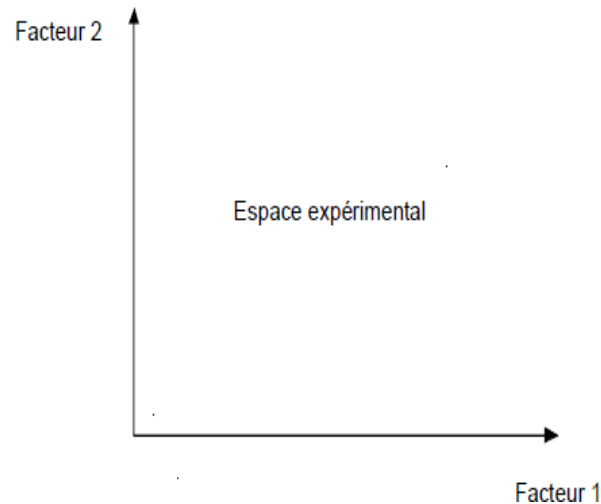


inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

**Figure I.9** Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

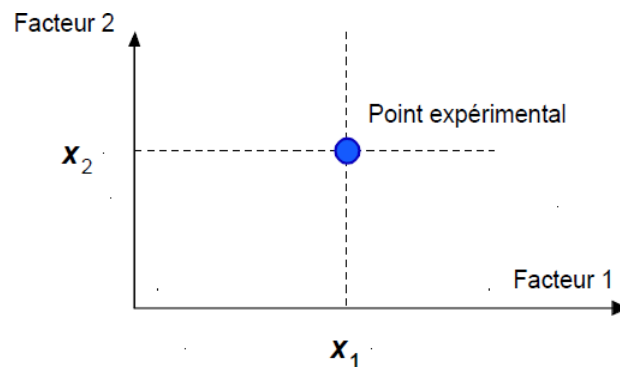
L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Fig. I.10).



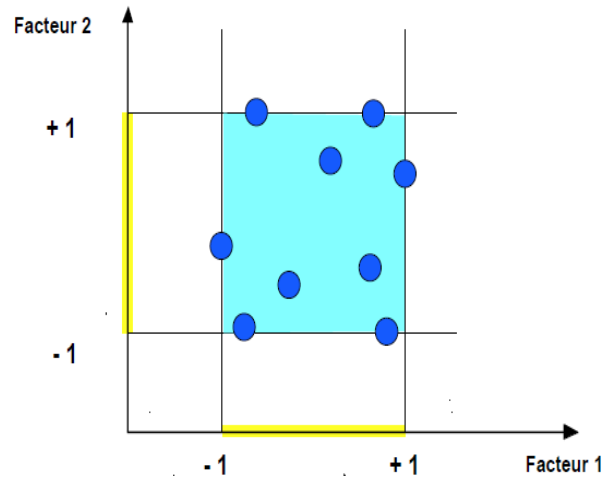
**Figure I.10.** Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Fig I.11). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.



**Figure I.11** Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies [30], est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Fig I.12).

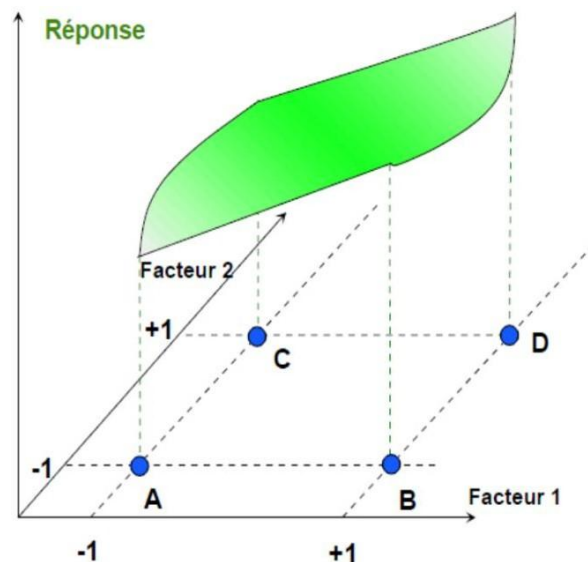


**Figure I.12.** Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse.

A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Fig. I.13).

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.



**Figure I.13.** Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

**I.6.1 Réponse**

Les grandeurs qui sont mesurés à chaque expérience sont appelées réponses. Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir là où les bonnes réponses.

**I.6.2 Surface de réponse**

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne, a priori, une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique a priori ou le modèle postulé. La forme la plus générale de ce modèle est:

$$Y = F (X_1, X_2, \dots X_i) \tag{4}$$

Où

Y est la grandeur de la réponse ou la grandeur d'intérêt

**I.6.3 Facteur**

Les variables que l'on désire étudier sont appelés facteurs. En général un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans d'expériences, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note le plus souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que l'on note le plus souvent par +1). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, constitue le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

**I.6.4 Modélisation mathématique**

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \tag{5}$$

où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- xi représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur

(hypothèse classique de la régression).

- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

### I.6.5 Plan à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré en unités codées. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + e \quad (6)$$

- $y$  est la réponse
- $x_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ .
- $a_0$  est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- $a_1$  est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.
- $a_2$  est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- $a_{12}$  est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- $e$  est l'écart.

L'étude à l'aide des plans d'expérience est réalisée au moyen de nouvelles variables. Il est donc nécessaire de procéder à un changement de variables. Lorsqu'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur +1 au niveau haut, on effectue deux modifications importantes : - On change l'unité de mesure - On déplace l'origine de mesures. Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables appelées variables centrées réduites ;

-Centrées pour indiquer le changement d'origine, -Réduites pour signaler la nouvelle unité. Le passage des variables d'origine « A » aux variables centrées réduites « X », est donné par la formule suivante ( $A_0$  est la valeur centrale de l'intervalle [-1 ; +1], exprimé en unité courante);

$$X = (A - A_0) / \text{Pas} \quad (7)$$

La formule (7) permet également de passer des variables centrées réduites aux variables d'origines. L'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quel que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs et leurs unités. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité [31].

**I.6.6 Matrice d'expériences**

La matrice d'expérience (tableau I.1) définit les essais à réaliser. Le terme essai est l'équivalent de points d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expériences.

**Tableau I.1** : Matrice d'expérience 2<sup>2</sup>

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Réponse
1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	$y_2$
3	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	$y_4$

**I.7 Conclusion**

On peut conclure d'après la recherche bibliographique l'intérêt des propriétés mécaniques des matériaux tels que : la résistance à la fatigue, la ténacité. Le procédé de traitement mécanique en l'occurrence le galetage a permis de voir l'amélioration des propriétés physiques et géométriques du matériau.

Le galetage est un procédé qui met en œuvre une déformation plastique des couche superficiels, de cette déformation résulte un bel aspect de surface caractérisé par une réduction de la rugosité, une amélioration de la qualité technologique l'introduction des contraintes résiduelles de compression qui contribuent une augmentation de la résistance à la fatigue et la ténacité.



**chapitre II:**

**Techniques et résultats expérimentaux**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, une présentation des moyens et des méthodes expérimentales seront exposées afin d'évaluer les propriétés suivantes : l'endurance  $\sigma_D$ , ténacité  $K_{Ic}$  en fonction des paramètres de traitement (effort de pression  $P$  et nombre de passe  $i$ ).

## II.2 Matériau

Le matériau est un alliage d'aluminium Al2024 à l'état T351 largement utilisé par les aviateurs. La composition chimique est donnée dans le tableau II.1

**Tableau II.1** : composition chimique de l'alliage Al 2024 T351

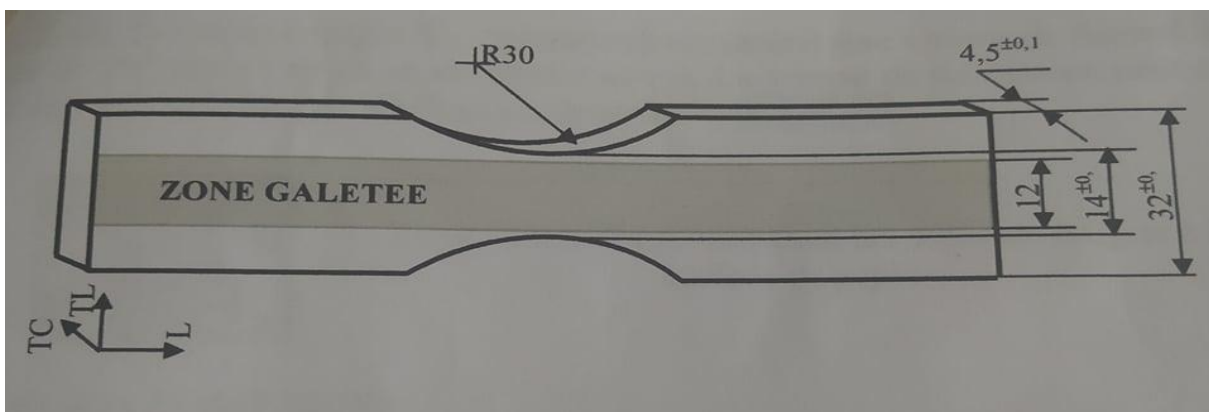
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,5	0,5	3,8/4,9	0,3/0,9	1,2/1,8	0,1	0,25	0,15

## II.3 Caractérisation mécanique

Les caractéristiques mécaniques moyennes mesurées dans le sens longitudinal (L) sont de l'ordre de :  $\sigma_e = (334 \text{ à } 339) \text{ MPa}$  ;  $R_{rt} = (463 \text{ à } 467) \text{ MPa}$  et  $A\% = (14,5 \text{ à } 16)\%$ .

La microstructure de l'alliage Al 2024 T351 mise en évidence à l'aide d'une attaque chimique au réactif de KELLER sur un échantillon préalablement poli a donné les dimensions moyennes des grains suivant les directions L(longitudinale), TL(travers long) et TC(travers court) respectivement de l'ordre :  $d_{moy} = 0,31 \times 0,220 \times 0,05 \text{ mm}$ .

Les éprouvettes de fatigue sont des plaques minces en forme dite "taille de guêpe" ayant selon le cas subi un traitement de galetage partiel sous des conditions variées de la pression et du nombre de passes combinés entre eux conformément au plan de la planification multifactorielle des expériences. Les essais de fatigue en traction ondulée ( $R=0,1$ ) ont été conduits sous chargement imposé avec une fréquence de 30Hz et à une température ambiante



**Figure II.1** Eprouvette de fatigue en AL2024T

La contrainte maximale de fatigue est celle qui vise une durée de vie  $N_r = 10^5$  cycles d'après la courbe de Wöhler (Fig II.2) [32].

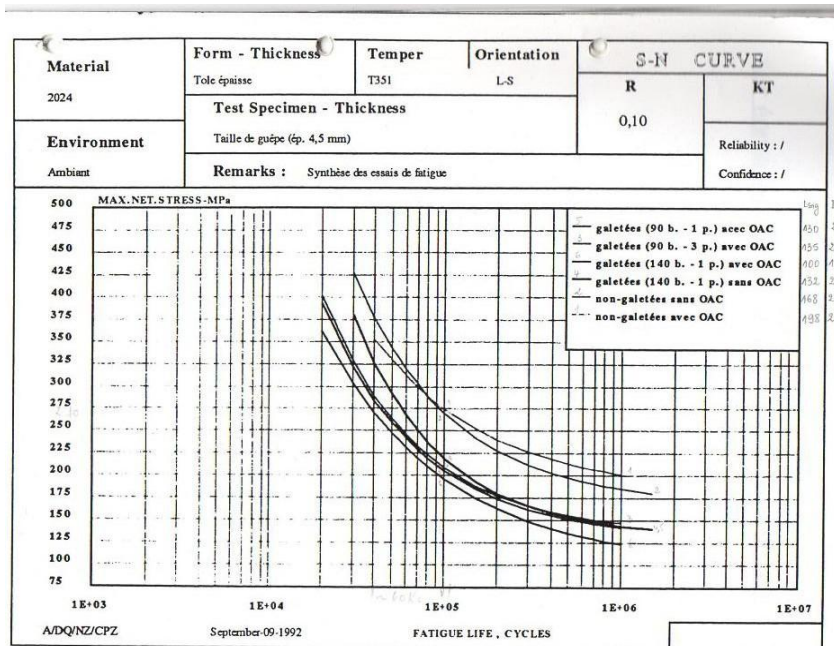


Figure II.2 Courbes de Wöhler sous diverses conditions de galetage

### II.4 Opération de galetage

Les conditions de galetage seront identiques aux conditions actuellement en production. Le galetage a été effectué sur une machine de production spécifique au galetage des raidisseurs. Le galet utilisé est en forme d'une molette de diamètre 40mm actionné par un vérin de section 14,5 cm<sup>2</sup>. Les paramètres de galetage retenus sont donnés dans le tableau II.2.

Pour caractériser la durée de vie et étudier l'influence du galetage sur la tenue en fatigue de l'alliage, des essais de fatigue industrielle ont été réalisés sur différentes éprouvettes galletées sous des conditions (pression et nombre de passes) variés. Selon le cas le galetage est éventuellement complet par une oxydation anodique chromique (OAC) qui de plus en plus employée, permet d'obtenir des films d'oxyde artificielle anticorrosifs et peut également jouer sur les propriétés mécaniques du matériau. (Fig. II.2)

**Tableau II.2 :** Endurance a  $10^5$  cycles et ténacité ( $K_{Ic}$ )

	Endurance a $10^5$ cycles $\sigma_D$ [MPa]	Ténacité $K_{Ic}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]
Galetées (140b, 1p)avec OAC	196	29,98
Galetées (140b, 3p) avec OAC	210	39,52
Galetées (90b, 1p) avec OAC	205	27,73
Galetées (90b, 3p) avec OAC	209	37,31

**II.5 Pland’expérience**

Le procédé s’est déroulé conformément aux plans d’expériences  $2^2$ , le régime adopté est en fonction du matériau(tableau II.3) et tient compte des deux facteurs principaux (P et i) où chacun d’eux est pris à son niveau haut (+1) et son niveau bas (-1). Ainsi 4 essais sont nécessaires pour analyser statistiquement l’influence de ces deux paramètres sur l’endurance à  $10^5$  cycles et la ténacité du matériau

**Tableau II.3 :** Facteurs codés

Facteurs Codés	Paramètres	Niveaux	
		-1	+1
X1	Force de pression P (bars)	90	140
X2	Nombre de passes (i)	1	3

Le modèle de planification d’expérience adopté prend en compte deux niveaux de variation et deux facteurs selon le plan suivant (tableau II.4) :

**Tableau II.4 :** Plan d’expériences pour le galetage

N°essai	Paramètres de régime	
	Facteur1	Facteur 2
	EffortP	Nombre de passes i
ESSAI N° 1	140	1 passe
ESSAI N° 2	140	3 passes
ESSAI N° 3	90	1 passe
ESSAI N° 4	90	3 passes

Les niveaux des deux facteurs sont combinés entre eux selon la matrice d'expérience suivante (Tableau II.5)

**Tableau II.5:** Les réponses mesurées après traitement de galetage et OAC

N° d'essai	Paramètres de régime			L'endurance $\sigma_D$	Ténacité $K_{Ic}$
	$X_1$ Effort P	$X_2$ Nombre de passe i	$X_1X_2$ Interaction P,i		
1	-1	-1	1	205	27,73
2	1	-1	-1	196	29,98
3	-1	1	-1	209	37,31
4	1	1	1	210	39,52

### II.6 Modèle des plans factoriels

Le modèle postulé des plans factoriels complets  $2^2$  est :

$$Y = [a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2] \tag{1}$$

- \_ Y est la réponse,
- $x_1$  représente le niveau du facteur 1
- $x_2$  représente le niveau du facteur 2
- $x_1x_2$  est le produit des niveaux des facteurs 1 et 2

Ou,

- $a_0$  est le coefficient constant du modèle ;  $a_0 = 1/4 [y_1 + y_2 + y_3 + y_4]$
- $a_1$  est le coefficient du facteur 1 ;  $a_1 = 1/4 [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4]$
- $a_2$  est le coefficient du facteur 2 ;  $a_2 = 1/4 [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4]$
- $a_{12}$  est le coefficient du terme  $X_1X_2$ .  $a_{12} = 1/4 [+y_1 - y_2 - y_3 + y_4]$

Après calcul des coefficients polynôme pour chaque réponse, les valeurs sont consignées sur le tableau II.6:

**Tableau II.6 :** Valeurs des coefficients polynôme

Coef du Polynôme	Endurance $\sigma_D$	Ténacité $K_{Ic}$
$a_0$	205	33,6
$a_1$	- 2,00	1,11
$a_2$	4,50	4,78
$a_{12}$	2,50	- 0,0100

**II.1 Les réponses avec les facteurs codés**

On introduisant les valeurs des coefficients du polynôme ( $a_0, a_1, a_2, a_{12}$ ) dans les expressions du modèle pour chaque paramètre, on trouve les réponses avec les facteurs codés suivantes :

1/ Réponse relative à l'endurance de «  $\sigma_D$  » :  
 $\sigma_D = 205 - 2,00 X_1 + 4,50 X_2 + 2,50 X_1 X_2 \dots \dots \dots (2)$

2/ Réponse relative à la ténacité de «  $K_{Ic}$  » :  
 $K_{Ic} = 33,6 + 1,11 X_1 + 4,78 X_2 - 0,0100 X_1 X_2 \dots \dots \dots (3)$

En remplaçant les facteurs codés par leurs valeurs naturelles d'après les équations (4) et (5), on trouve les modèles mathématiques de notre expérience en valeurs naturelles comme indiqué dans les relations (6) et (7):

$$X_1 = \frac{P - P_0}{P_{asp}}, X_2 = \frac{i - i_0}{P_{asi}} \quad (4)$$

$$P_0 = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}, P_{asp} = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (5)$$

$$i_0 = \frac{i_{max} + i_{min}}{2}, P_{asi} = \frac{i_{max} - i_{min}}{2} \quad (6)$$

L'endurance de «  $\sigma_D$  » :

$$\sigma_D = 205 - 2,00 P + 4,50 i + 2,50 P i \quad (7)$$

La ténacité «  $K_{Ic}$  » :

$$K_{Ic} = 33,6 + 1,11 P + 4,78 i - 0,0100 P i \quad (6)$$

D'après la figure II.3 on peut remarquer lorsque la force de pression P augmente et le nombre de passe i diminue l'endurance diminue ( $\sigma_D < 198$ ), lorsque la force de pression P diminue et le nombre de passe i augmente l'endurance augmente ( $207 < \sigma_D < 210$ ).

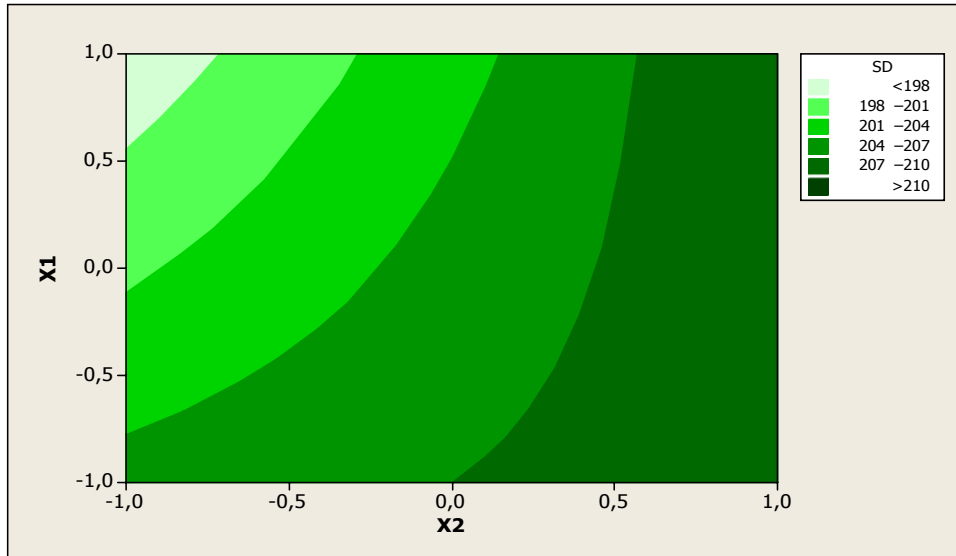


Figure II.3 : courbe de contour de l'effet des paramètres du galetage sur l'endurance

D'après la figure II.4 on peut remarquer lorsque la pression P diminue et le nombre de passe i diminue la ténacité diminue ( $K_{Ic} < 28$ ). Lorsque la pression P augmente et le nombre de passe i augmente la ténacité augmente ( $K_{Ic} > 38$ ).

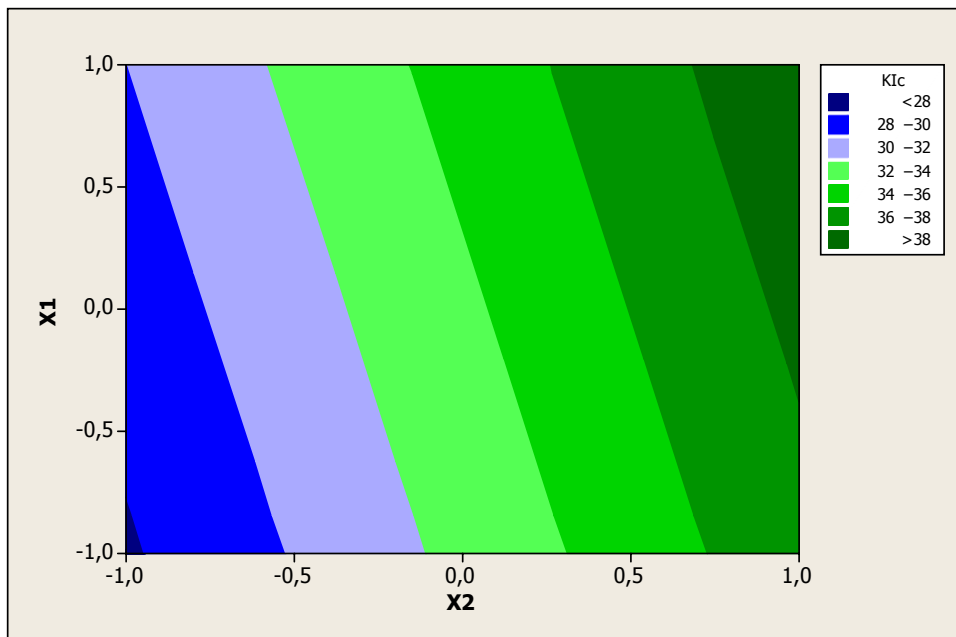
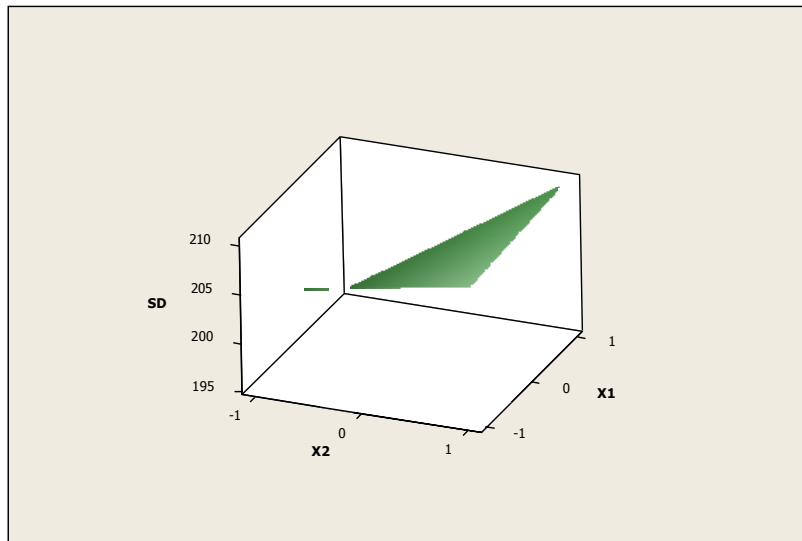
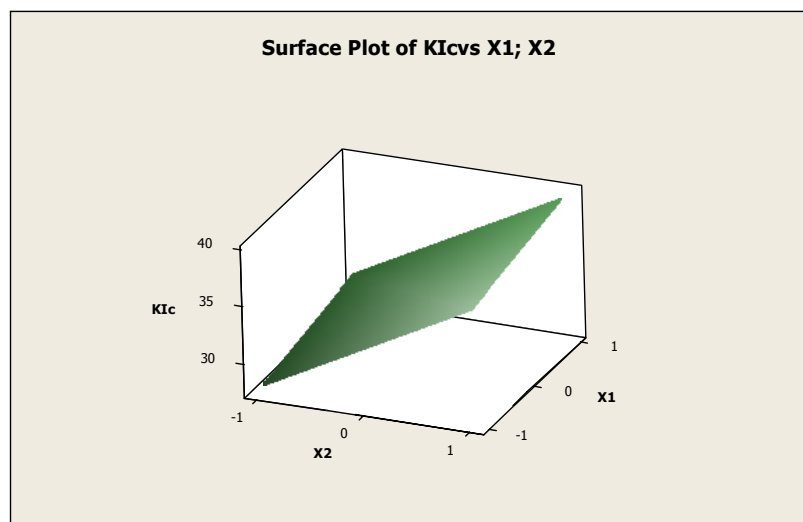


Figure II.4 : courbe de contour de l'effet des paramètres du galetage sur la ténacité

Les figure II.5 et II.6 montre la variation de l'endurance et la ténacité en fonction des deux paramètres du galetage (p, i)



**Figure II.5:** Influence des paramètres du galetage sur l'endurance

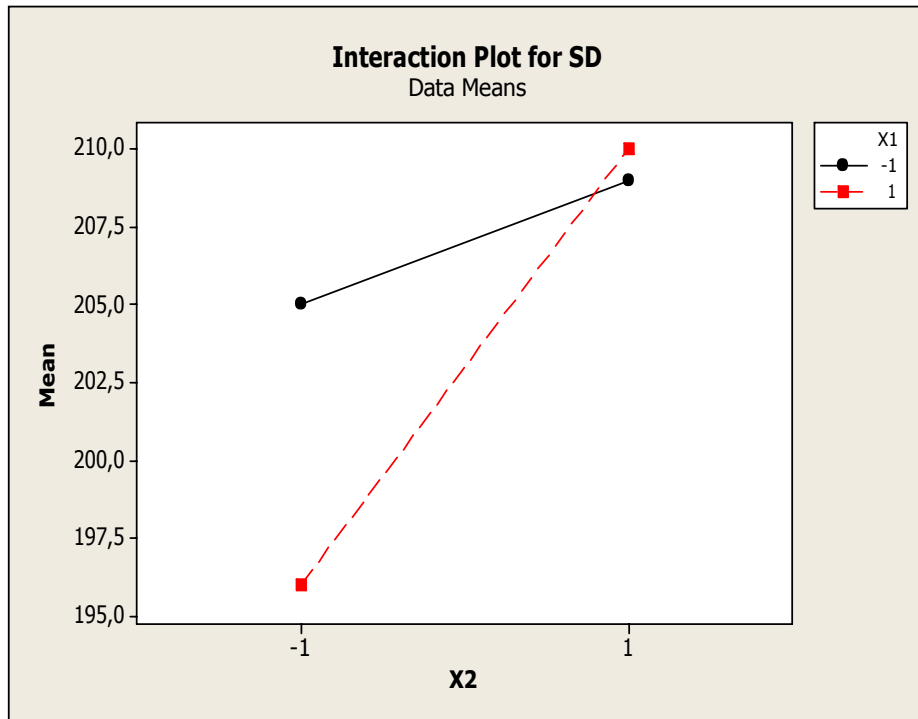


**Figure II.6:** Influence des paramètres du galetage sur la ténacité

## II.2 Etude des interactions entre P et i

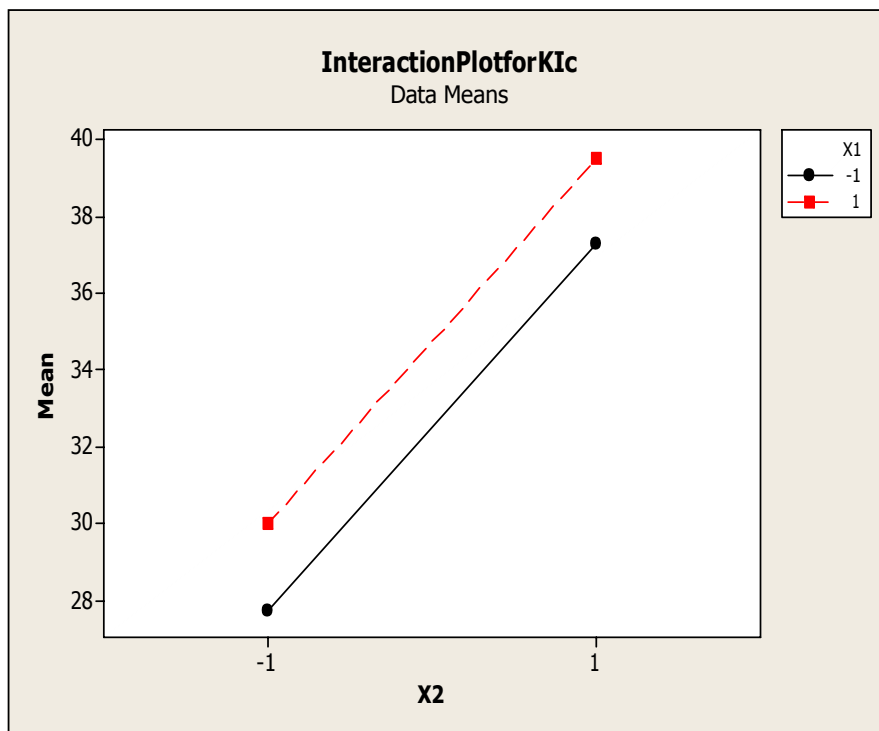
D'après une analyse du graphe de la figure II.7 de l'interaction pour l'endurance entre la pression et de nombre de passe. Une grande pression (140 bars) a une grande interaction par rapport à la faible pression (90 bars)





**Figure II.7:** Diagramme des interactions pour l'endurance  $\sigma_D$

De la même façon les facteurs P et i n'ont pas une interaction signification pour la ténacité (Fig II.8).



**Figure II.8:** Diagramme des interactions pour ténacité  $K_{Ic}$

D'après la fig II.9 on peut remarquer quel que soit la pression P et le nombre de passe i faible l'endurance réduite, et quel que soit la pression P et le nombre de passe i grande l'endurance augmente

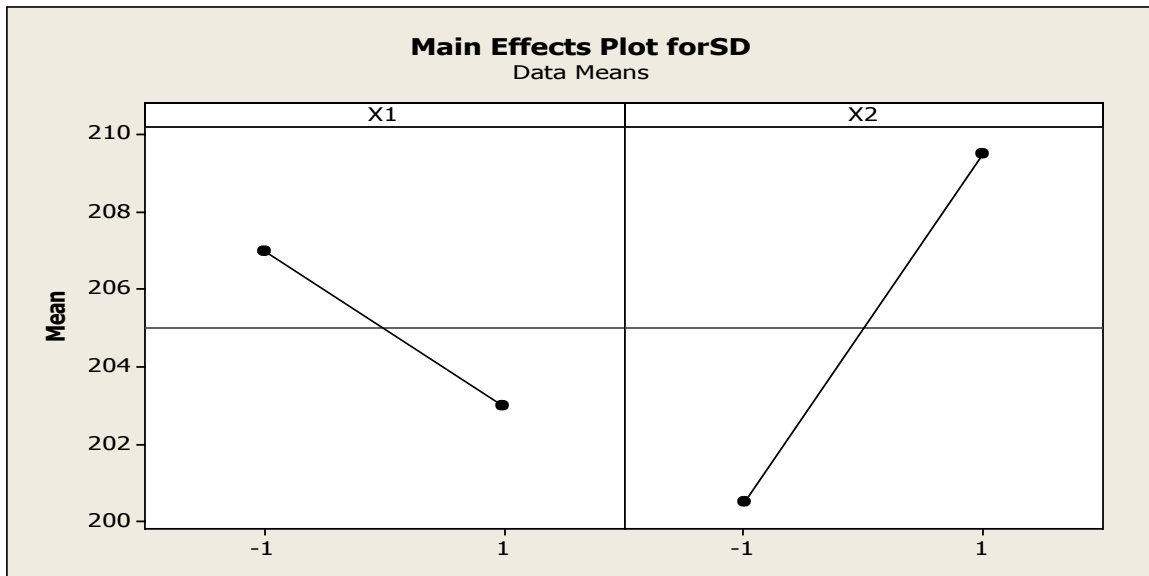


Figure II.9 : droite d'effet des paramètres du galetage sur l'endurance

D'après la figure II.10 lorsque la pression augmente et le nombre de passe augmente la ténacité augmente

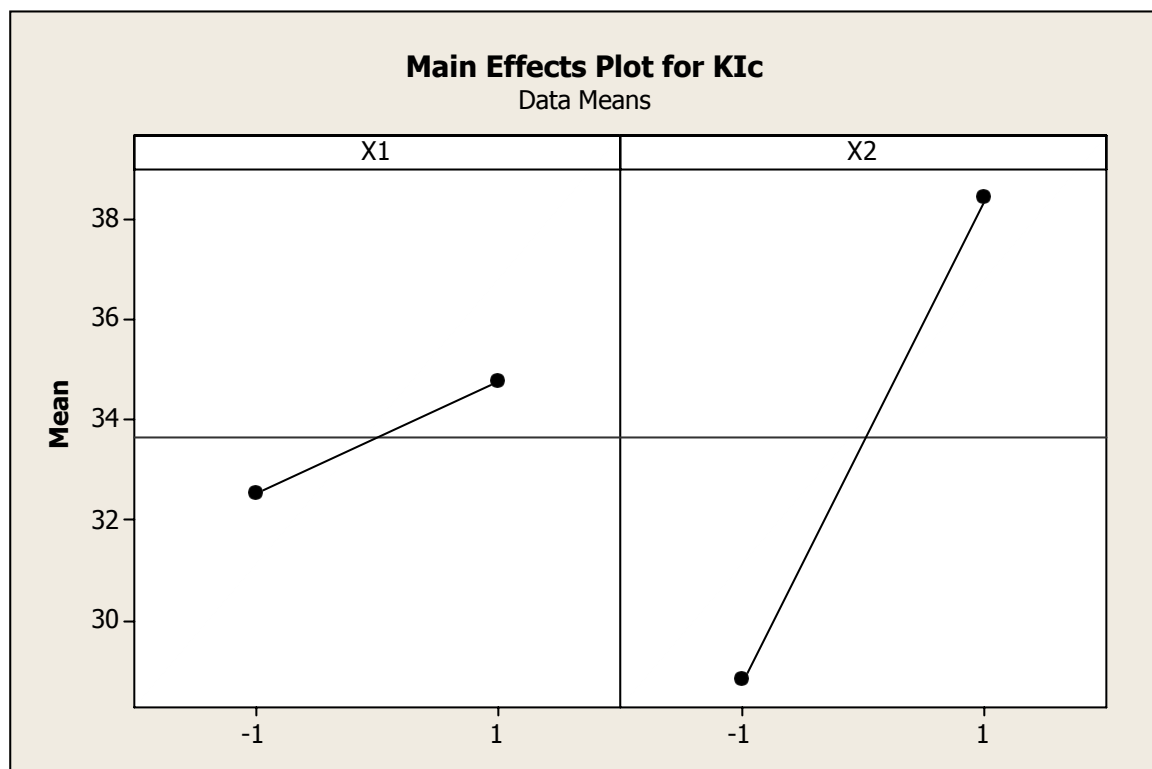
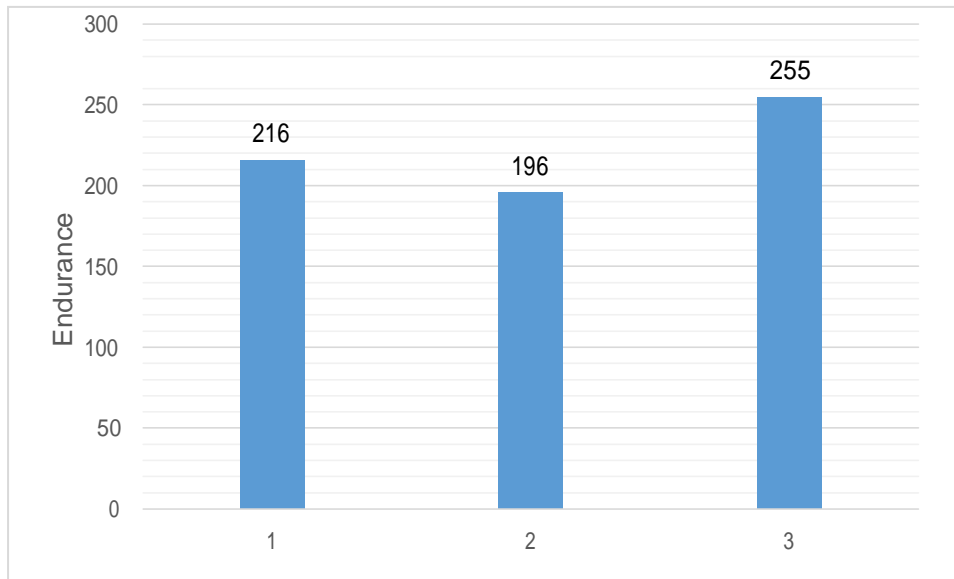


Figure II.10: droite d'effet des paramètres du galetage sur la ténacité

L'analyse de l'histogramme de la figure II.11, montre que, pour une pression  $P=140$  bars, quel que soit le nombre de passes (1ou3), le galetage associé à l'OAC diminue l'endurance de l'aluminium. C'est-à-dire dans ces conditions le galetage n'a pas donné ses effet bénéfiques tel que rapporté par la bibliographique. Toutefois en augmentant le nombre de passe de 1 à 3, on augmente l'endurance de 196 à 216 MPa. Soit une augmentation de 10.20 %.



**Figure II.11:** Influence de galetage et OAC sur l'endurance

1 : galetage (140b-3p)-OAC, 2 : galetage (140b-1p) +OAC, 3 : non galeté –OAC (usiné)

## Conclusion générale

Devant la croissance d'utilisation des matériaux, la connaissance et le développement des caractéristiques et propriétés structurale et mécanique fiables est devenu un enjeu très important sur le plan scientifique, technologie et économique.

Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés mécaniques tels que : la résistance à la fatigue et la ténacité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques.

Les travaux de ce projet ont été orientés pour voir l'analyse statistique des effets des paramètres de galetage sur la tenue en fatigue. Une recherche bibliographique a mis en évidence, l'intérêt des traitements mécaniques de surface sur la fatigue et la ténacité d'un alliage d'Aluminium 2020 T351 traité par un galetage partiel et ayant subi une OAC.

Il ressort dans une première analyse des résultats que les conditions dans lesquelles le procédé est appliqué n'apportent pas les effets bénéfiques attendus.

Ainsi l'influence des paramètres du galetage ont été étudiés statistiquement au moyen de la méthodologie des plans d'expérience factorielle d'ordre  $2^2$  qui a permis d'observer l'influence des paramètres de galetage ( $P, i$ ) sur les réponses étudié à la savoir l'endurance à  $10^5$  cycles ( $\sigma_D$ ) et la ténacité ( $K_{IC}$ ). A cet effet il a été possible d'établir peuvent constituer un outil d'envergure pour l'établissement des modèles mathématiques, permettant la prédiction des réponses et l'optimisation des régimes de traitement.

Les résultats ont montré que les deux facteurs sont significatifs et qu'une interaction est possibles entre eux.

En augment  $p$ , on diminue  $\sigma_D$  et on augmente  $K_{IC}$  En

augment  $i$ , on augmente  $\sigma_D$  et on augmente  $K_{IC}$

Ainsi ce travail ouvre une perspective à une étude complète dans les différentes phases d'amorçage et de propagation des fissures pour mieux localiser les meilleurs effets du traitement.

## Références bibliographiques

- [1] Eric lachance (2014) propriétés des plastique : cristallin ou amorphe ,magazine de circuit industriel p 1.
- [2]Dr ,A. raskin(2009, 2010), Rappels atomiques, structure des metaux, des alliage et des ceramique p25.
- [3] web.www.wikipedia.org.cubique a face centré
- [4] web.Deuns, chez. Com/sciense /cristallo/cristallo1.html
- [5] Vincent Robin.fonderie:moulage en moule non permanent.
- [6] web.Techno. Science. Net/definition/deformationplastique.
- [7] A. Pineau, A. Zaoui, D. Francois (1991), « Comportement mécanique des matériaux»,Hermès.
- [8] Dr. Bennegadi, Mohammed el larbi (2018). Plycopie de coupe des metaux en fabrication mecanique et productique p1.
- [9] Berria Mohamed Faouzi (2018), Mémoire fin d'étude, Usinage par électroérosion d'un tourillonp11. Université Badji Mokhtar Annaba
- [10] L.SEDOV (1975), mécanique des milieux continus, IZDATELVSTVO «Hayka » 1973,Traductionfrançaise,EditionsMir.
- [11]L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir1975.
- [12] G FRADE ; (1970), Métallographie essais mécaniques.
- [13] J-P Baillon, J-M Dorlot (2000), Des Materiaux, Presses Internationales polytechnique, Ecole polytechnique de Montréal.
- [14] www.wikipedia.org/wiki/Ductilite.
- [15] Berlioux N - Jacob JC - Gilloux JF (2010), la ténacité, p2-7, cours de l'IUT de Chambéry.
- [16] Lieu rade H.P. (1991). Rupture par fatigue des aciers. Ed. Institut de Recherches de la Sidérurgie Française, collectionIRSID-OTUA
- [17] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) Étude expérimentalede la fatigue en flexion rotative mémoire d'Ingénieur d'état Département génie mécanique. Faculté de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [18] Claude ROBIN (2010), FATIGUE - ENDURANCE Ecole des Mines de Douai.
- [19] Said Bensaada,cours sur Traitements thermiques, Classification et désignation des aciers et fontes, p2-3.
- [20] web.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/trempe.
- [21] www.bodycote.com/fr/services/traitement-thermique/trempe-et-revenu.

- [22] Noé Verner Murillo Gutierrez (2014), Protection contre la corrosion d'alliages de magnésium par des revêtements issus de la voie sol-gel, thèse de doctorat, paris, p 26.
- [23] [www.a3ts.org/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/anodisation-chromique](http://www.a3ts.org/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/anodisation-chromique).
- [24] F. clocke, J. Lierman (1998), Roller burnishing of hard turned surface, Int. J Mach. Tools Manufact,p61-65
- [25] Fabien Degré (2012), Prédiction numérique des caractéristiques d'une pièce traitée par galetage : application au secteur du décolletage , these de doctorat de L'Universite de grenoble
- [26] M. Bourebia, L.Laouar et A. Hamadache (2013) Amélioration de laqualité de surface par le procédé de brunissage, AFM, Maison de la Mécanique, France(FR) -12-20 Acte du 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013.
- [27] M. M Khabeery, M. H. El-Axir (2001), Experimental techniques of studing the effects of milling roller burnishing parameter on surface integrity, Mach. Tools Manufact p41.
- [28] Zemmouchi Mohamed lazher (2016),mémoire Etude des effets du brunissage sur les caractéristiques du PEHD TR144 (Avec et sans noir de carbone),p33
- [29] Said Bensaada M.T.Bouziane,cours Tribologie, Principes et materiaux p19
- [30] Jaques Goupy (1999), Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Dunod Paris.
- [31] J. GOUPY (1988), La Méthode des Plans d'Expériences, Dunod, Paris, p46
- [32] Hamadache hamid (2000), Influence du galetage sur la tenue en fatigue. Thèse de Magister Université de Annaba.