

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER II

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : fabrication mécanique et productique

Par :

CHERAKRAK Anis

KADRI Lyes

Thème

Étude statistique de la distribution de la dureté et de la rugosité de l'acier XC38, de l'acier 42CD4 et de l'alliage d'aluminium ALCu2Mg

Soutenu le 26 juin 2024 devant le jury composé de :

M. SAHALI Mohand Akli	Président
M. BENSALD Nasreddine	Rapporteur
M. HARROUCHE Fatah	Examineur

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le Bon Dieu pour le courage et la patience qui m'a donné afin de mener ce projet à terme.

Tout d'abord, nous tenons à remercier nos Parents de nous avoir inculqués, très jeune, une éducation portée sur l'intégrité, la droiture et la justice.

*Je tiens à remercier le **Dr BENS Aid Nasreddine** qui a dirigé se mémoire dans la continuité de mes études. Tout au long de cette année.*

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche, pour tous les moments agréables partagés durant cette formation ainsi que pour la bonne ambiance de travail qui a régné pendant la période de préparation de nos PFE. Bon courage pour la suite.

Dédicace

Nous dédions notre travail à :

*Mon cœur et mon âme, ma lune dans les nuits, mon
bonheur, mon amour et ma joie qui se sont sacrifiés pour
me donner l'espoir dans la vie, a ceux qui m'ont donné
l'amour sans limite,*

*À vous ma **Mère** et mon **Père**.*

Sans oublier :

*Mes sœurs, Mes frères, Mes chers amis, et toute ma
famille.*

Sommaire

Introduction générale	7
-----------------------------	---

Chapitre I : Théorie de la statistique

I.1 Introduction :	9
I.2 Définition de la statistique :	9
I.3. Notions de statistiques descriptives :	10
I.3.1. Population statistique	10
I.3.2. Échantillon	10
I.3.3 Les Paramètres de positions	10
I.3.3.1. La moyenne	10
I.3.3.2. Le Mode Mo.....	11
I.3.3.3 La médiane Me.....	11
I.3.4 Les paramètres de dispersion	11
I.3.4.1. La Variance	11
I.3.4.2. L'ecart-type	12
I.3.4.3. L'étendue.....	12
I.4. Notions de statistique inférentielle	12
I.4.1. Définition de la statistique inférentielle	12
I.4.2. Notions sur l'estimation	12
I.4.2.1. Estimation ponctuelle.....	13
I.4.2.2. Estimations par intervalle de confiance	14
I.4.3. Coefficient de corrélation linéaire.....	15
I.4.4. Corrélation	16
I.4.4.1. Modèles de Corrélation.....	18
I.4.5. Régression linéaire simple	19
I.4.5.1. Modèles de Régression	19
I.5. Conclusion	20

Chapitre II : Théorie des Matériaux ductiles

II.1. Introduction :	22
II.2 Définition des aciers alliés	23
II.2.1. Aciers faiblement alliés :	23
II.2.2. Aciers fortement alliés	24
II.2.3. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)	25

II.3. Définition de la dureté.....	25
II.3.1 Principe de l'essai de dureté	25
II.3.1.1 Dureté Brinell (symbole HB).....	26
II.3.1.2 Dureté Rockwell (symbole HR).....	27
II.3.1.3 Dureté Vickers (symbole HV)	27
II.4 Module de Young.....	28
II.5. Le coefficient de poisson.....	29
II.6.1. Mise en forme	30
II.7 L'usinage	30
II.7.1 Tournage	31
II.7.2 Principe de tournage	32
II.8. les alliages	34
II.8.1 Aluminium et ses alliages	34
II.8.3. Propriétés de l'aluminium :	34
II.8.3.1. Propriétés physiques :	34
II.8.3.2 : Propriétés mécaniques :	35
II.8.3.3 Propriétés chimiques.....	35
II.8.3.4 Propriétés de mise en forme.....	36
II.8.4 Alliages d'aluminium	36
II.8.4.1. Influence des éléments d'addition principale.....	37
II.8.4.2 Influence des éléments d'addition secondaires.....	37
II.8.4.3 Désignation normalisée des alliages d'aluminium.....	38
II.8.5. Alliages de cuivre	39
II.8.6 Alliages de magnésium.....	40
II.8.9 Alliage ferreux	41
II.8.9.1. Les aciers	41
II.9 Conclusion.....	42

Chapitre III : Partie Expérimentale

III.1 Introduction :	44
III.2 Résultats obtenus	46
III.2.1 Matériau : XC38.....	46
III.2.2. Matériau : 42CD4.....	48
III.2.3 Matériau : Al-Cu2Mg.....	50
III.3 Régression linéaire entre le facteur rugosité et dureté	51

III.4. Conclusion	53
Conclusion Générale.....	56

Liste des figures

Figure 1 Mesure de la ductilité d'un matériau.....	23
Figure 2 principe de la dureté brinell.	26
Figure 3 principe de la dureté Rockwell.	27
Figure 4 principe de la dureté Vickers.	27
Figure 5 Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie.....	31
Figure 6 Exemple d'opération sur le tournage en phase chariotage.	32
Figure 7 Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire	34
Figure 8 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau XC38.....	46
Figure 9 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau 42CD4.....	48
Figure 10 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau Al-Cu2Mg.	50

Liste des Tableaux

Tableau 1 Désignation des aciers faiblement alliés	24
Tableau 2 Valeurs du module de Young de quelques matériaux	29
Tableau 3 Valeurs du coefficient de poisson de quelques matériaux	29
Tableau 4 Opération et outil essentiel en Tournage	33
Tableau 5 Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium.....	35
Tableau 6 Influence des éléments d'addition principale	37
Tableau 7 Influence des éléments d'addition secondaires.....	38

NOMENCLATURE

Symboles

Définition

HB :	Dureté Brinell
HR :	Dureté Rockwell
HV :	Dureté Vickers
Am :	Déformation plastique à la striction
E :	Module de Young [MPa]
Re :	Limite élastique [MPa]
Rm :	Limite à la rupture [MPa]
\hat{m} :	Estimation ponctuelle de la moyenne de la population
\bar{X} :	Moyenne de l'échantillon.
σ :	Estimation de l'écart type de la population.
σ_e :	Écart type de l'échantillon
N :	Taille de l'échantillon.
α :	Niveau de signification ou d'erreur.
Z :	paramètre tiré de la table de la loi normale.
n :	Taille de l'échantillon
Zα :	Est tiré de la table de la loi normale.
σ :	contrainte (en unité de pression MPa),
ε :	l'allongement relatif (adimensionnel)

Introduction générale

Introduction générale

L'étude statistique de la distribution de la dureté et de la rugosité des matériaux est cruciale dans le domaine de l'ingénierie des matériaux et de la fabrication. Cette étude se concentre spécifiquement sur trois matériaux importants : l'acier XC38, l'acier 42CD4 et l'alliage d'aluminium ALCu2Mg. La dureté et la rugosité sont des propriétés mécaniques fondamentales qui influencent directement la performance et la durabilité des composants mécaniques dans divers secteurs industriels, allant de l'aéronautique à l'automobile, en passant par la construction.

L'acier XC38, par sa composition et ses propriétés, est largement utilisé dans des applications nécessitant une résistance élevée et une bonne usinabilité. De même, l'acier 42CD4 est réputé pour sa robustesse et sa capacité à résister aux charges dynamiques, en faisant un matériau de choix pour les pièces soumises à des contraintes sévères. Enfin, l'alliage d'aluminium ALCu2Mg est apprécié pour sa légèreté combinée à une excellente résistance à la corrosion, ce qui en fait une option privilégiée dans les structures où le poids et la durabilité sont des facteurs critiques.

Cette étude vise à analyser de manière approfondie la distribution de la dureté et de la rugosité dans des échantillons représentatifs de ces trois matériaux. En utilisant des méthodes statistiques avancées telles que l'analyse de variance, les tests de normalité et les techniques de régression, nous cherchons à fournir des données précises et significatives sur ces caractéristiques essentielles. Ces données seront essentielles pour comprendre et améliorer les performances des composants fabriqués à partir de ces matériaux, tout en soutenant les décisions de conception et d'ingénierie dans des environnements industriels exigeants.

CHAPITRE I

Théorie de la statistique

I.1 Introduction :

La théorie statistique est un domaine fondamental des mathématiques et des sciences appliquées qui se concentre sur l'analyse, l'interprétation et l'utilisation des données. Elle repose sur des principes mathématiques et probabilistes pour comprendre le comportement des phénomènes aléatoires et pour tirer des conclusions à partir d'échantillons de données.

Cette discipline joue un rôle crucial dans de nombreux domaines tels que la science, l'économie, la sociologie, la médecine, et bien d'autres, en fournissant des outils et des techniques pour la collecte, la présentation, l'analyse et l'interprétation des données empiriques.

Les principes de base de la théorie statistique incluent la probabilité, l'estimation, les tests d'hypothèses, la régression, et la modélisation statistique. Ces concepts permettent aux chercheurs et aux praticiens de décrire les phénomènes observés, de faire des prédictions et de prendre des décisions éclairées basées sur des données souvent incomplètes ou bruitées.

En résumé, la théorie statistique constitue le cadre intellectuel et méthodologique essentiel pour transformer les données en informations exploitables, contribuant ainsi de manière significative à la compréhension du monde et à la prise de décisions dans de nombreux domaines d'activité humaine.

I.2 Définition de la statistique :

La statistique implique l'analyse d'un phénomène via la collecte, le traitement, l'analyse et l'interprétation des données, le tout dans le but de rendre ces informations accessibles à tous. Elle constitue une discipline scientifique, une approche méthodologique et un ensemble de pratiques techniques.

Le but de la statistique est d'extraire des informations pertinentes d'une liste de nombres difficile à interpréter par une simple lecture. Deux grandes familles de méthodes sont utilisées selon les circonstances. Rien n'interdit de les utiliser en parallèle dans un problème concret mais il ne faut pas oublier qu'elles résolvent des problèmes de natures totalement

distinctes. Selon une terminologie classique, ce sont la statistique descriptive et les mathématiques. Aujourd'hui il semble que des expressions comme analyse des données et statistique différentielles soient préférées, ce qui est justifié par le progrès des méthodes utilisées dans le premier cas. [1]

I.3. Notions de statistiques descriptives :

La statistique descriptive vise à résumer ou représenter les données disponibles lorsqu'elles sont nombreuses, afin d'en fournir une description concise et compréhensible. [2]

I.3.1. Population statistique

Un ensemble, dans le sens mathématique du terme, fait référence à un groupe d'objets ou de personnes homogènes qui sont étudiés. Il représente la totalité des éléments pris en considération et sur lesquels on souhaite obtenir des informations. [3]

I.3.2. Échantillon

Un échantillon, dans le contexte d'une étude statistique, est constitué d'éléments choisis pour représenter une population plus large. Ces éléments peuvent être des objets, tels que les pièces prélevées dans une ligne de production pour vérifier leur conformité, des informations telles que les mesures d'épaisseur en divers points d'une plaque, ou encore des êtres vivants dans le cadre de la surveillance sanitaire. De même, les humains sont souvent étudiés à travers des sondages d'opinion. [3]

I.3.3 Les Paramètres de positions

Les paramètres de position sont les paramètres de la série statistique qui précisent vers quelles valeurs se situe la série. [4]

Les paramètres de position sont :

I.3.3.1. La moyenne

La moyenne ne se définit que pour une variable statistique quantitative.

$$\bar{X} = \frac{n_1 X_1 + n_2 X_2 + \dots + n_p X_p}{N} = \frac{1}{N} \sum n_i X_i$$

La moyenne arithmétique est la somme des valeurs de la variable divisée par le nombre d'individus. [4]

I.3.3.2. Le Mode Mo

Dans une étude statistique, on est souvent conduit à chercher la valeur (ou la classe) que l'on rencontre le plus fréquemment. [4]

I.3.3.3 La médiane Me

La médiane d'une série statistique, symbolisée par Me, représente le nombre qui divise la population en deux groupes de même taille : d'une part, les individus dont la valeur du caractère est inférieure à la médiane, et d'autre part, ceux dont la valeur du caractère est supérieure à la médiane. [4]

I.3.4 Les paramètres de dispersion

Les paramètres de dispersion sont calculés pour les variables statistiques quantitatives. Ils ne fournissent pas une description exhaustive d'une variable statistique X ; en effet, deux variables ayant la même moyenne peuvent présenter des niveaux de dispersion très différents. [5]

I.3.4.1. La Variance

Soit $x = (x_i, n_i)$ variable statistique réelle On appelle variance de x la moyenne arithmétique des carrés des écarts x a sa moyenne. [5]

$$v(x) = \frac{n_1 (x_1 - \bar{x})^2 + n_2 (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_p (x_p - \bar{x})^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_p} = \frac{1}{N} \sum n_i (x_i - \bar{x})^2$$

Elle indique de quelle manière la série statistique se disperse autour de sa moyenne.

I.3.4.2. L'écart-type

L'écart-type d'une série statistique, noté $\sigma(x)$ est la racine carrée de la variance. [5]

$$\sigma(x) = \sqrt{v(x)}$$

I.3.4.3. L'étendue

L'étendue d'une série statistique quantitative, qu'elle soit discrète ou continue, correspond à la différence entre la plus grande et la plus petite des valeurs de la variable.

L'étendue est la mesure la plus simple de la dispersion tandis que les moyennes, mode et médiane mesurent la position d'une série statistique. [5]

$$E(X) = X_{max} - X_{min}$$

I.4. Notions de statistique inférentielle

I.4.1. Définition de la statistique inférentielle

La statistique inférentielle englobe un ensemble de techniques visant à tirer des conclusions robustes à partir de données issues d'échantillons statistiques. Cela inclut des méthodes telles que les estimations, les tests d'hypothèses, les analyses de corrélation, etc. L'interprétation des données statistiques revêt une importance cruciale dans ce processus, et elle est guidée par plusieurs principes et axiomes fondamentaux.

Son but est d'étendre les propriétés constatées sur l'échantillon à toute la population et valider des hypothèses a priori. [3]

I.4.2. Notions sur l'estimation

La théorie de l'estimation explore les relations entre les caractéristiques connues des échantillons et celles de la population correspondante. La précision est généralement exprimée par un intervalle dans lequel le paramètre à estimer est susceptible de se trouver, avec une probabilité prédéterminée. [6]

I.4.2.1. Estimation ponctuelle

L'estimation est dite ponctuelle si elle fournit une seule valeur estimée de ce paramètre [6]

a) Moyenne de la population \hat{m}

La meilleure estimation ponctuelle de la moyenne de la population est [7]

$$\hat{m} = \bar{X} = \frac{\sum x_i n_i}{N}$$

\hat{m} : Estimation ponctuelle de la moyenne de la population

\bar{X} : Moyenne de l'échantillon.

b) L'écart type estimé de la population σ [6]

$$s = \sigma = \sqrt{\frac{N}{N-1}} \cdot \sigma_e$$

$s = \sigma$: Estimation de l'écart type de la population.

σ_e : Écart type de l'échantillon.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 n_i}{N} - \bar{X}^2}$$

N : Taille de l'échantillon.

I.4.2.2. Estimations par intervalle de confiance

a) De la moyenne de la population m (distributions normales)

On recherche un intervalle centré sur \hat{m} avec une probabilité égale à α

$$\hat{m} \in \left[\bar{X} - \frac{Z_{\alpha} \cdot S}{\sqrt{N}} ; \bar{X} + \frac{Z_{\alpha} \cdot S}{\sqrt{N}} \right]$$

α : Niveau de signification ou d'erreur.

Z : est un paramètre tiré de la table de la loi normale.

b) Estimation de la variance de la population σ^2 (distribution normale) par intervalle de confiance

Intervalle d'une distribution normale entre a et b de la variance.

Dans la distribution normale il n'existe pas de différence significative entre les individus de cette population autrement dit σ qui représente les degrés d'uniformité dans la population et σ^2 qui représente le paramètre de dispersion ne présente pas une divergence dans leur sens [6].

c) Estimation des proportions par intervalle de confiance

La population est divisée en deux proportions ou catégories l'une possède le caractère A et l'autre ne le possède pas, si on tire un individu de la population de façon aléatoire et qui possède le caractère A avec une probabilité p et celui qui ne le possède pas avec la probabilité $q = 1 - p$ alors, En tirant n individus de la population possédant le caractère A représenté par la variable aléatoire x suit la loi binomiale avec deux paramètres n et p dans ce cas $x \sim B(n, p)$ et on aura [6] :

$E(x) = n \cdot p$: L'espérance mathématique

$Var(x) = n \cdot p \cdot q$

$$I_p = \left[\frac{k}{n} - Z_{\alpha} \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot \hat{q}}{n}} ; \frac{k}{n} + Z_{\alpha} \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot \hat{q}}{n}} \right]$$

$\hat{p} = \frac{k}{n}$: Proportion d'individus dans l'échantillon possédant le caractère A.

$q = 1 - p$: Proportion d'individus dans l'échantillon ne possédant pas le caractère A.

n : Taille de l'échantillon.

$Z\alpha$: Est tiré de la table de la loi normale.

I.4.3. Coefficient de corrélation linéaire

Le coefficient de corrélation linéaire simple, dit de Bravais-Pearson (ou de Pearson), est une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables. [8]

$$r_{xy} = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sigma_x * \sigma_y}$$

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 n_i}{N} - \bar{X}^2} \right) \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 n_i}{N} - \bar{Y}^2} \right)}$$

$\text{Cov}(x, y)$: covariance(x,y)

X et Y sont indépendants, alors $r = 0$. La réciproque est fautive, sauf cas particulier que nous précisons maintenant

- Lorsque le couple de variables (X, Y) suit une loi normale, et uniquement dans ce cas, nous avons l'équivalence $r = 0 \Leftrightarrow X$ et Y sont indépendants. Dans ce cas, le coefficient de corrélation caractérise parfaitement la liaison entre X et Y. Dans les autres cas, le coefficient de corrélation constitue une mesure parmi les autres de l'intensité de la corrélation.
- Le coefficient de corrélation constitue une mesure de l'intensité de liaison linéaire entre deux variables.
- La corrélation d'une variable avec elle-même est $r_{xx} = 1$.

- Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure des variables, ce qui autorise les comparaisons. La mesure est normalisée, elle est définie entre deux bornes ;

$$-1 \leq r \leq +1$$

Lorsque :

- $r = +1$, une forte liaison linéaire entre X et Y est positive et parfaite c'est-à-dire.
- $r = -1$, une forte liaison linéaire entre X et Y est négative. [8]

I.4.4. Corrélation

La recherche d'une forme de relation entre deux caractères à l'aide d'une représentation graphique appropriée représente une corrélation entre X et Y [9]

Les modalités de X et de Y caractérisent l'ensemble des points qui forme un nuage dont la forme permet de caractériser la relation à l'aide de trois critères :

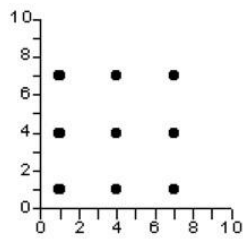
Intensité de la relation : forte, faible ou nulle

Forme de la relation :

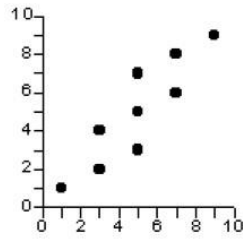
Linéaire si l'on peut trouver une relation entre X et Y de la forme $Y=aX+b$

Non-linéaire si la relation entre X et Y n'est pas de la forme $Y=aX+b$

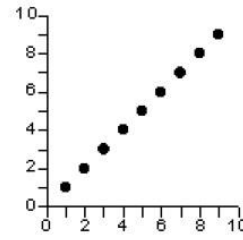
Sens de la relation : positive si les 2 caractères varient dans le même sens, négative s'ils varient en sens inverse



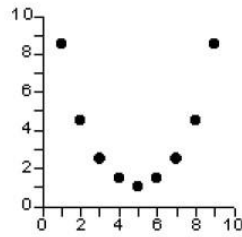
absence de relation



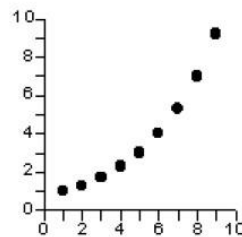
relation faible



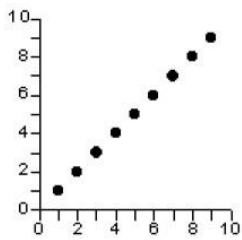
relation forte



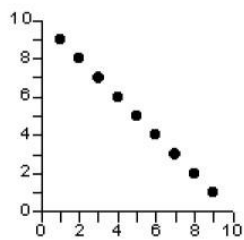
relation non-linéaire



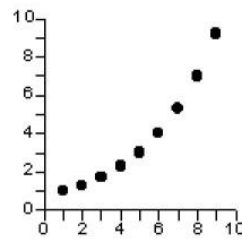
relation non-linéaire



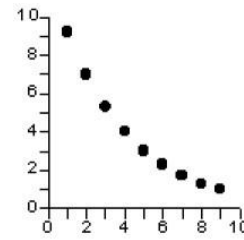
relat linéaire positive



relat linéaire négative



non-linéaire positive



non-linéaire négative

La relation entre X et Y est donnée par le Coefficient de corrélation r_{xy} :

Obtenir une corrélation entre deux variables X et Y n'autorise pas à inférer un lien de causalité de quelque nature qu'il soit : X et Y varient conjointement, mais on ne peut pas affirmer que X est la cause de l'apparition de Y et inversement. [9]

Propriétés de $r(xy)$

- si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre X et Y
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre X et Y
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre X et Y

Remarque :

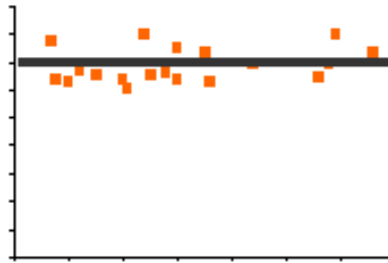
Le coefficient de Pearson n'est applicable que pour mesurer la relation entre X et Y ayant une distribution de type gaussien

Le coefficient de Spearman permet de mettre en évidence des relations non-linéaires entre X et Y. [9]

I.4.4.1. Modèles de Corrélation [9]

- Coefficient de corrélation nul : Pente de la droite de régression nulle

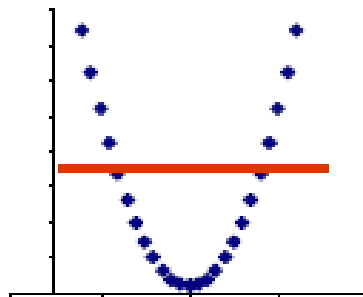
X et Y sont indépendants. La liaison est linéaire (le nuage de points est résumé par une droite horizontale d'équation $y = a$)



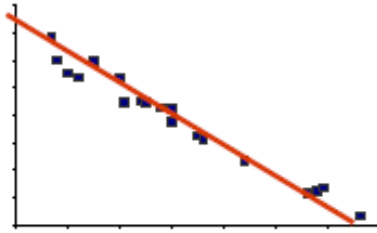
- Coefficient de corrélation nul Pente de la droite de régression nulle

Il existe une liaison entre X et Y non linéaire :

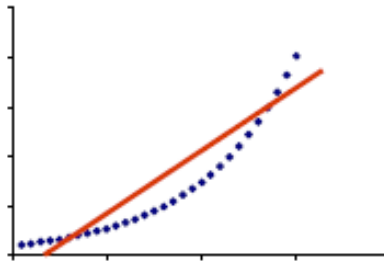
Le nuage de points est résumé plutôt par une fonction quadratique



- Coefficient de corrélation non nul Pente de la droite de régression non nulle la liaison est linéaire (le nuage de points est résumé par une droite d'équation $y = ax+b$)



- Coefficient de corrélation non nul Pente de la droite de régression non nulle la liaison n'est pas linéaire (le nuage de points est résumé par une fonction exponentielle)



I.4.5. Régression linéaire simple

La régression est la fonction qui relie les variables explicatives Y à la variable expliquée X est linéaire dans ses paramètres. [9]

Les 2 variables un rôle asymétrique : la variable Y dépend de la variable X. (X ne dépend pas de Y) représentée graphiquement par une droite : $Y = \alpha X + \beta$

Y : variable dépendante (expliquée)

X : variable indépendante (explicative)

I.4.5.1. Modèles de Régression [9]

- Régression linéaire

Ex :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots$$

- **Régression linéaire multiple**

décrit les variations d'une variable endogène Y_i ($i=1 \dots n$ observations) associée aux variations p variables exogènes x_p :

$$Y_i = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_px_p$$

- **Régression logistique**
- **Régression non paramétrique**
- **Régression multiple postulés et non postulés**

I.5. Conclusion

En conclusion, la théorie statistique représente une pierre angulaire des sciences et des disciplines appliquées, offrant des méthodes rigoureuses pour l'analyse et l'interprétation des données. Grâce à ses outils probabilistes et mathématiques, elle permet de comprendre le comportement des phénomènes aléatoires, d'effectuer des prédictions fiables et de prendre des décisions éclairées basées sur des observations empiriques.

Cette discipline joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines, de la recherche scientifique à la gestion d'entreprises, en passant par la médecine et la politique publique. En fournissant des cadres pour la collecte systématique de données, l'analyse quantitative et la vérification des hypothèses, la théorie statistique contribue à renforcer la crédibilité et la fiabilité des conclusions tirées des données empiriques.

En somme, la théorie statistique est bien plus qu'un ensemble de techniques ; c'est une approche méthodologique fondamentale qui aide à démystifier la complexité des données et à extraire des informations précieuses pour améliorer notre compréhension du monde qui nous entoure.

CHAPITRE 2
Théorie des
Matériaux ductiles

II.1. Introduction :

La théorie des matériaux ductiles est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux sous contrainte. Ces matériaux, tels que certains aciers et alliages, se caractérisent par leur capacité à subir des déformations plastiques importantes avant de se rompre. Contrairement aux matériaux fragiles, qui se cassent soudainement sous contrainte, les matériaux ductiles peuvent absorber l'énergie de manière significative, ce qui leur confère une meilleure résistance aux chocs et aux variations de charge.

La ductilité est souvent liée à la structure microscopique des matériaux, en particulier à la manière dont les dislocations se déplacent dans le réseau cristallin. Ce déplacement permet aux matériaux de se déformer de façon progressive, offrant ainsi une marge de sécurité dans de nombreuses applications industrielles et de construction. Comprendre les mécanismes de la ductilité est crucial pour la conception de structures capables de résister aux conditions extrêmes, garantissant à la fois performance et sécurité.

Dans cette perspective, l'étude des matériaux ductiles englobe des aspects allant de la mécanique des matériaux à la science des matériaux, en passant par la métallurgie et l'ingénierie, offrant ainsi une approche multidisciplinaire pour améliorer la performance des matériaux utilisés dans divers domaines. [10]

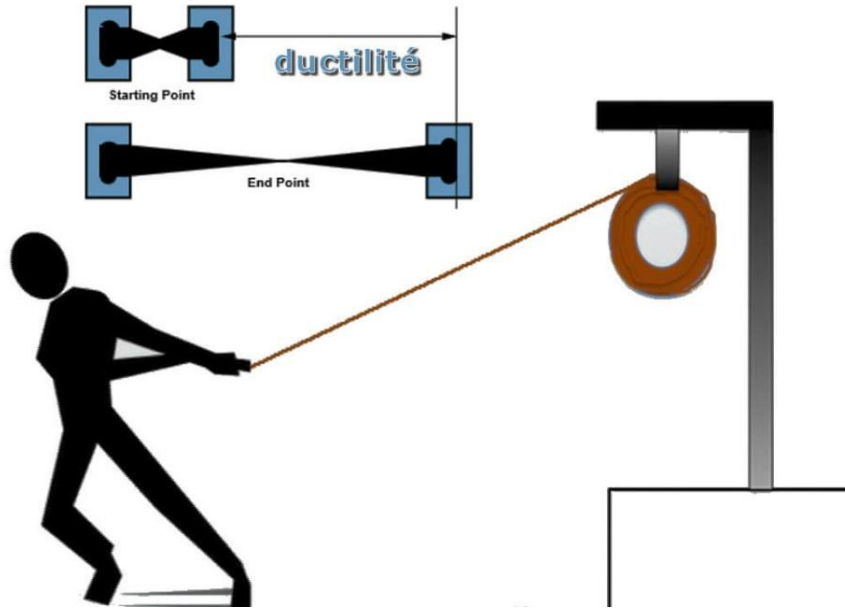


Figure 1 Mesure de la ductilité d'un matériau

II.2 Définition des aciers alliés

Parfois, il est essentiel d'opter pour un acier allié doté de propriétés spécifiques absentes dans l'acier non allié ordinaire. Lors de la fabrication de ce matériau, des éléments supplémentaires sont incorporés pour conférer de nouvelles fonctionnalités. Conformément aux normes françaises, la teneur en un composant additionnel doit être égale ou supérieure à celle indiquée dans le tableau des concentrations massiques autorisées. [11]

II.2.1. Aciers faiblement alliés :

Les aciers sans éléments d'addition dépassant pas 5 % sont caractérisés par une désignation en trois étapes :

- Un nombre entier, correspondant à cent fois le pourcentage moyen en carbone.
- Un ou plusieurs groupes de lettres représentant les symboles chimiques des éléments d'addition, classés par ordre décroissant de concentration.
- Une série de nombres alignés selon l'ordre des éléments d'alliage, indiquant le pourcentage moyen de chaque élément.

CHAPITRE II : Théorie des Matériaux ductiles

Les pourcentages sont ajustés par un coefficient multiplicateur variable selon les éléments d'alliage (voir Tableau I.5).

L'incorporation d'éléments d'alliage renforce la résistance mécanique et permet un durcissement en profondeur lors de la trempe. [11]

Nuance	R _{min}	Re _{min}
38 Cr 2	800	650
34 Cr 4	880	660
37 Cr 4	930	700
41 Cr 4	980	740
55 Cr 3	1100	900
100 Cr 6	HRC ≥ 62	
25 Cr Mo 4	880	700
35 Cr Mo 4	980	770
42 Cr Mo 4	1080	850
16 Cr Ni 6	800	650
17 Cr Ni Mo 6	1130	880
30 Cr Ni Mo 8	1030	850
51 Cr V 4	1180	1080
16 Mn Cr 5	1080	835
20 Mn Cr 5	1230	980
36 Ni Cr Mo 16	1710	1275
51 Si 7	1000	830
60 Si Cr 7	1130	930
NOTA : Cette symbolisation s'applique aussi aux aciers non alliés de décolletage.		

Tableau 1 Désignation des aciers faiblement alliés

II.2.2. Aciers fortement alliés

Les aciers fortement alliés sont définis par la présence d'au moins un élément d'addition dépassant 5 % en teneur. Leur désignation commence par la lettre X, suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés, à l'exception des valeurs des teneurs, qui sont des pourcentages réels nominaux. [11]

Un exemple de désignation normalisée : X2CrNi18-9 (c'est un acier inoxydable).

Les aciers rapides (high speed steels, HSS) font partie de cette famille.

II.2.3. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)

Ces aciers démontrent une résistance remarquable à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage, une déformation irréversible. Leur composition est principalement enrichie en chrome, qui leur confère une résistance à l'oxydation, et en nickel, qui améliore leurs propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont catégorisés en quatre familles : ferritique, austénitique, martensitique et austéno-ferritique.

Les aciers inoxydables austénitiques se distinguent par leur grande ductilité, qu'ils préservent même à des températures très basses (-200 °C). Leurs applications sont diverses : industrie chimique, nucléaire, agroalimentaire, mais aussi dans la coutellerie et les appareils ménagers. Ils renferment au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

Quant aux aciers à haute résistance à la corrosion, ils peuvent être divisés en deux catégories : ceux alliés au chrome, qui, après un refroidissement à l'air, adoptent une structure martensitique ou ferritique, et ceux alliés au chrome-nickel, qui présentent une structure austénitique. [12]

II.3. Définition de la dureté

La définition de la dureté est la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps plus dur. La mesure de la dureté est essentielle dans l'analyse métallographique, car elle offre une première évaluation des propriétés mécaniques et souvent, elle confirme l'interprétation des structures métalliques. La méthode de mesure de la dureté dépend du type de charge appliquée sur le corps d'essai lors de sa pénétration dans le matériau. [13]

- Procédé avec action statique (par pénétration).
- Procédé par action dynamique (par rebondissement).

II.3.1 Principe de l'essai de dureté

La méthode de mesure de la dureté implique l'utilisation d'un pénétrateur pour enfoncer dans le métal à tester. Une charge constante est appliquée et la dimension de l'empreinte laissée par le pénétrateur est mesurée. Cette empreinte est d'autant plus grande que le métal

est plus dur. La dureté, notée **H**, est exprimée par le rapport entre la force appliquée et la surface de l'empreinte. [14]

II.3.1.1 Dureté Brinell (symbole HB)

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F , et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. [15]

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

G : accélération terrestre (9.8m/s^2)

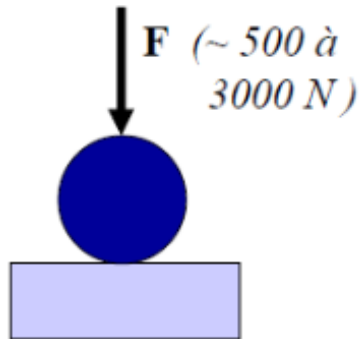


Figure 2 principe de la dureté brinell.

II.3.1.2 Dureté Rockwell (symbole HR)

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur normalisé (cône en diamant ou d'une bille en acier trempé) et à mesurer l'accroissement rémanent « e » de la profondeur de pénétration. [15]

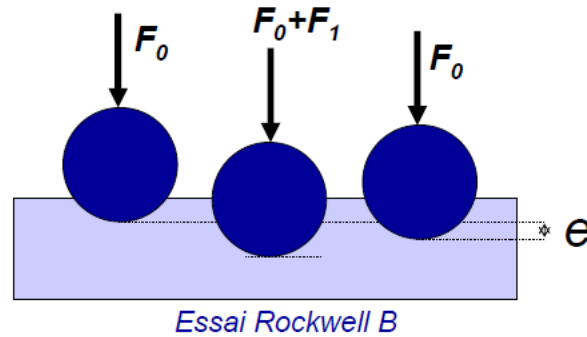
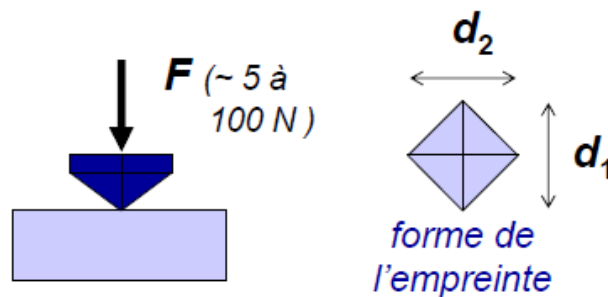


Figure 3 principe de la dureté Rockwell.

II.3.1.3 Dureté Vickers (symbole HV)

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous une charge F, et à mesurer la diagonale « d » de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. [15]

$$HV = \frac{0.189 \times F}{d^2}$$



- Tel que $d = d_1 + d_2$.

Figure 4 principe de la dureté Vickers.

II.4 Module de Young

Le module de Young, aussi connu sous le nom de module d'élasticité longitudinale, ou encore module de traction, représente la constante qui établit la relation entre la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) a observé que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte, c'est-à-dire l'allongement relatif, reste constant tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas dépassée. Cette relation est formalisée par la loi d'élasticité, également connue sous le nom de loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon$$

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

Où :

- σ est la contrainte (en unité de pression MPa),
- E est le **module de Young** (en unité de pression MPa),
- ε est l'allongement relatif (adimensionnel)

Un matériau ayant un module de Young très élevé est qualifié de rigide. Des exemples de matériaux très rigides comprennent l'acier, l'iridium et le diamant. En revanche, l'aluminium et le plomb sont moins rigides, tandis que les matières plastiques et organiques sont généralement peu rigides.

D'après l'équation aux dimensions, le module de Young est homogène à une pression, ou plus précisément une contrainte. L'unité internationale est donc le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général donné en méga pascal (MPa) ou newton par millimètre carré (N/mm²). [16]

Matériau	Module d'Young	Limité d'élasticité en traction
Acier de construction non allié	210 000 MPa	285-355 MPa
Alliage d'aluminium	74 000 MPa	240 MPa
Acier faiblement allié à haute résistance	210 000 MPa	750-1450 MPa
Titane	116 000 MPa	260 MPa
Cuivre	100 000 MPa	40 MPa

Tableau 2 Valeurs du module de Young de quelques matériaux [17]

II.5. Le coefficient de poisson

Le coefficient principal de Poisson est utilisé pour décrire la contraction d'un matériau perpendiculairement à la direction de la force appliquée.

Désigné par la lettre grecque ν , le coefficient de Poisson fait partie des constants élastiques. Il est théoriquement égal à 0,25 pour un matériau parfaitement isotrope et est en pratique très proche de cette valeur.

Dans le cas d'un matériau isotrope, le coefficient de Poisson permet de relier directement le module de cisaillement G au module de Young E . Le coefficient de Poisson est toujours inférieur ou égal à $1/2$. S'il est égal à $1/2$, le matériau est parfaitement incompressible. [18]

Alliages	
Matériau	ν
Acier de construction	0,27 – 0,30
Acier inoxydable	0,30 – 0,31
Fontes	0,21 – 0,26
Laiton	0,37

Tableau 3 Valeurs du coefficient de poisson de quelques matériaux [18]

II.6.1. Mise en forme

Les procédés de mise en forme visent à donner une forme spécifique à un matériau tout en lui conférant une microstructure particulière, afin d'obtenir un objet aux propriétés souhaitées. Ce travail requiert une maîtrise précise des paramètres expérimentaux tels que la composition du matériau, la température, la pression et la vitesse de refroidissement. [19]

Voici quelques-unes des techniques de mise en forme pour différents matériaux :

- **Forgeage** : Cette technique, utilisée depuis plus de 5 000 ans, consiste à exercer une force sur le matériau pour le façonner. Elle englobe des méthodes telles que l'emboutissage, le laminage, le tréfilage et le filage.
- **Fonderie** : Elle implique la fusion et le coulage du métal dans un moule, avec différentes méthodes comme le moulage en sable, le moulage coquille et le moulage à la cire perdue.
- **Frittage** : Ce procédé, basé sur la métallurgie des poudres, permet de consolider la poudre sous l'effet de la chaleur, la rendant compacte.

II.7 L'usinage

L'usinage désigne toute opération de mise en forme réalisée par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil dans le but de donner à une pièce des dimensions et un état de surface précis, incluant l'écart de forme et la rugosité. Ce processus implique l'utilisation d'un outil coupant bien défini (avec des caractéristiques telles que le matériau, les dimensions, le revêtement, etc.) pour enlever de la matière d'une pièce spécifique (avec des caractéristiques telles que le matériau, les dimensions, etc.). L'usinage engendre des zones de cisaillement qui mettent en jeu plusieurs phénomènes, notamment : [20]

- La métallurgie, incluant la fissuration et les transformations structurales ;
- La thermodynamique, en ce qui concerne le chauffage ;
- La tribologie, qui traite des phénomènes de contact, de frottement et d'usure ;
- La mécanique des matériaux, concernant le comportement à différentes températures et vitesses de déformation ;

- La mécanique des solides, qui comprend la dynamique, les forces et les vibrations.

II.7.1 Tournage

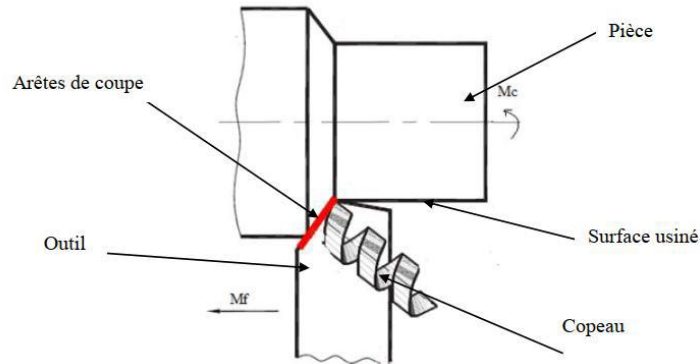
Le procédé d'usinage que vous décrivez est en effet le tournage, réalisé sur une machine-outil appelée tour. Le tournage est couramment utilisé pour fabriquer des pièces cylindriques ou coniques, en enlevant progressivement des copeaux de matière à l'aide d'outils coupants. C'est un processus essentiel dans de nombreux secteurs de fabrication, de l'automobile à l'aérospatiale en passant par la construction navale.

Le tour conventionnel, comme illustré dans la figure (I.1), est un type de tour où la pièce à usiner est fixée sur un mandrin rotatif et l'outil de coupe se déplace longitudinalement et transversalement pour enlever la matière. Bien que les tours conventionnels soient encore largement utilisés, de nos jours, on trouve également des tours à commande numérique (CNC) qui offrent des capacités plus avancées de programmation et de contrôle pour produire des pièces complexes avec une grande précision. [21]



Figure 5 Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie.

Dans ce procédé la pièce à usiner est fixée dans un mandrin, entre pointes. Le mouvement de coupe est associé à la pièce et c'est un mouvement de rotation, quand ou mouvement d'avance qui est une translation est associé à l'outil comme il est illustré sur la figure (I.2)



suivante :

Figure 6 Exemple d'opération sur le tournage en phase chariotage. [22]

II.7.2 Principe de tournage

Le mouvement circulaire uniforme de la pièce est appelé le mouvement de coupe (M_c), tandis que le mouvement de translation parallèle ou oblique de l'outil par rapport à l'axe de rotation est appelé le mouvement d'avance (M_f). Lorsque l'outil se déplace le long de la pièce en effectuant le mouvement d'avance, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice. Cette génératrice transforme la pièce en un solide de révolution. En ajustant le déplacement radial de l'outil, il est possible d'obtenir différentes formes de solides de révolution, comme des cylindres, des cônes, des sphères, etc.

En plus de créer des formes externes, le tournage permet également de façonner des formes internes en utilisant des opérations telles que le perçage et l'alésage. Ces processus permettent de réaliser des trous, des cavités et d'autres caractéristiques internes dans la pièce usinée.

CHAPITRE II : Théorie des Matériaux ductiles

Dans le tableau (I.1) suivant nous avons cités brièvement quelques opérations essentielles dans le tournage, tout en donnant un outil avec plaquette en carbure et un autre sans plaquette qui réalise cette opération. [23]


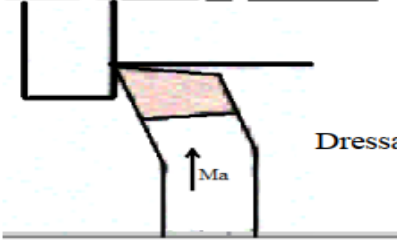


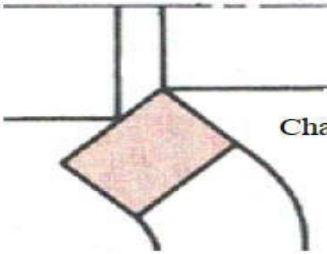


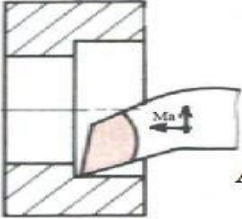

L'outil	Type d'opération réalisé
 <p data-bbox="378 583 643 611">Outil à dresser en ARS</p>	 <p data-bbox="1198 653 1325 680">Dressage</p>
 <p data-bbox="289 779 756 806">Outil à dresser avec plaquette de carbure</p>	
 <p data-bbox="354 961 638 989">Outil à charioter en ARS</p>	 <p data-bbox="1198 961 1341 989">Chariotage</p>
 <p data-bbox="289 1094 776 1121">Outil à charioter avec plaquette de carbure</p>	
 <p data-bbox="337 1220 586 1247">Outil à aléser en ARS</p>	 <p data-bbox="1198 1310 1308 1337">Alésage</p>
 <p data-bbox="289 1346 743 1373">Outil à aléser avec plaquette de carbure</p>	

Tableau 4 Opération et outil essentiel en Tournage. [23]

II.8. les alliages

II.8.1 Aluminium et ses alliages

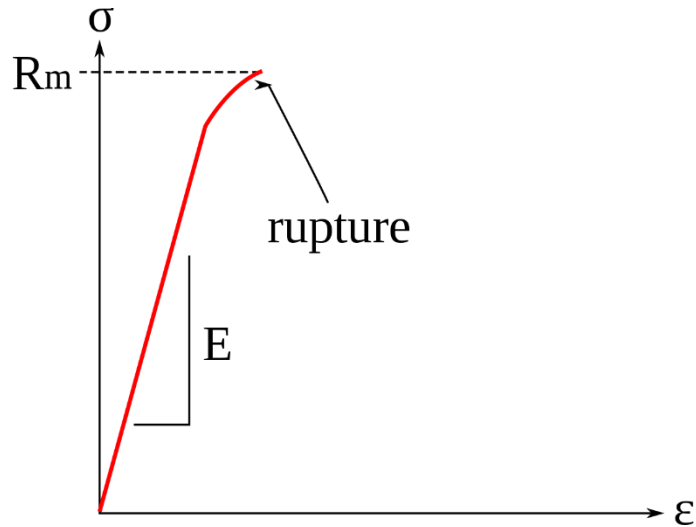


Figure 7 Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire

II.8.3. Propriétés de l'aluminium :

II.8.3.1. Propriétés physiques :

L'aluminium est un élément du 3ème groupe de la classification périodique de Mendeleïev, avec un numéro atomique de 13 et une masse atomique de 26,98. Sa température de fusion est d'environ 660°C et celle d'ébullition est d'environ 2467°C. Sa structure cristalline est cubique à faces centrées (CFC), avec une distance interatomique équidistante de $a = 4,0412 \text{ \AA}$. Sa caractéristique la plus remarquable est sa faible densité, qui est de $2,7 \text{ g/cm}^3$ à température ambiante. Cette densité reste généralement inférieure à 3 g/cm^3 dans les alliages légers. L'aluminium présente une bonne conductibilité thermique de $0,57 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ et une excellente conductibilité électrique mesurée à environ $2,6548 \text{ ohms.mm}^2/\text{m}$. [25]

II.8.3.2 : Propriétés mécaniques :

- **Résistance à la traction** : Les propriétés mécaniques de l'aluminium non allié recuit sont généralement assez limitées. Il est moins rigide que les aciers, avec un module de Young compris entre 65 000 et 70 000 MPa, comparé à celui des aciers de construction qui est d'environ 210 000 MPa. L'allongement à la rupture varie de 23 à 43%. Les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique (recuit, écroui ou trempé). Bien que les éléments d'addition puissent conférer à l'aluminium non allié recuit une multitude de propriétés, la plupart d'entre eux n'influencent pas significativement le module de Young, car leur concentration ne dépasse généralement pas 8% du composé.
- **Coefficient de Poisson** : Le coefficient de Poisson des alliages d'aluminium est de 0,35. Les principales caractéristiques retenues sont regroupées dans le tableau I.1 [24]

Propriété	Valeur
Module d'élasticité	70000 MPa
Module de cisaillement (Coulomb)	27000 MPa
Coefficient de Poisson ν	0,35
Masse volumique ρ	2700 Kg. m ⁻³
Coefficient de dilatation linéique α	2700 Kg. m ⁻³

Tableau 5 Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium

II.8.3.3 Propriétés chimiques

L'aluminium est en effet hautement réactif et se recouvre rapidement d'une couche d'alumine (Al₂O₃) à sa surface, ce qui lui confère une certaine résistance à la corrosion. Cette couche d'alumine est compacte et offre une bonne protection contre la corrosion. Par anodisation, il est possible d'épaissir cette couche pour renforcer davantage la résistance aux attaques, notamment des bases. De ce fait, l'aluminium et ses alliages peuvent être

utilisés comme revêtements extérieurs de bâtiments. En pratique, le comportement de l'aluminium en termes de résistance à la corrosion dépend largement des propriétés du film d'oxyde qui le recouvre.

Effectivement, les problèmes de résistance à la corrosion de l'aluminium sont souvent associés à des modifications du degré de porosité du film d'oxyde qui le recouvre. De plus, l'aluminium est sujet à une sensibilité à la corrosion localisée, comme la corrosion par piqûres. Ce type de corrosion peut entraîner la rupture du film protecteur d'oxyde, exposant ainsi davantage le métal à la corrosion. [24]

II.8.3.4 Propriétés de mise en forme

La température de fusion relativement basse de l'aluminium, à 660 °C, confère un avantage significatif lors des opérations de fusion, rendant la fonderie plus aisée. De plus, sa grande ductilité permet de le façonner facilement à l'état solide par déformation plastique.

II.8.4 Alliages d'aluminium

Les propriétés mécaniques de l'aluminium pur sont effectivement relativement faibles, ce qui limite son utilisation dans certaines applications. Toutefois, ces propriétés peuvent être considérablement améliorées par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. [25]

a) Additions principales (éléments d'alliages) : Effectivement, les additions de différents métaux dans l'aluminium sont déterminantes pour ses propriétés de résistance et définissent son appartenance à différents groupes d'alliages. Parmi ces ajouts, on peut citer le cuivre, le silicium, le magnésium et le manganèse. Chacun de ces éléments contribue à modifier les caractéristiques mécaniques de l'aluminium, lui conférant des propriétés spécifiques adaptées à diverses applications.

b) Additions secondaires (éléments d'aditions) : En effet, ces métaux sont ajoutés à certains alliages d'aluminium en quantités relativement faibles, généralement inférieures à 1%. Leur incorporation vise à conférer des propriétés particulières ou spécifiques à l'alliage, tout en conservant son groupe d'appartenance. Parmi ces ajouts figurent le fer, le chrome, le zirconium, le nickel, le strontium, le cobalt, le plomb, le bismuth, le cadmium,

le titane, l'antimoine, l'étain, le béryllium et le bore. Chacun de ces éléments peut apporter des caractéristiques uniques à l'alliage, adaptées à diverses applications industrielles.

II.8.4.1. Influence des éléments d'addition principale

Ils sont résumés dans le tableau suivant : [26]

Elément	Avantage	Inconvénient
Cu	Caractéristique mécaniques Tenue à chaud et au fluage Facilite l'usinage	Resistance a la corrosion Soudabilité Conductivité électrique
Mn	Aptitude a la déformation Résistance a la corrosion Aptitude au brasage	
Si	Coulabilité	Usinabilité (usure des outils) Coefficient de dilatation linéaire
Mg	Caractéristiques mécaniques Resistance a la corrosion Soudabilité	Déformation a chaud
Mg+Si	Caractéristiques mécaniques Déformation a chaud	
Zn+Mg	Caractéristiques mécaniques Usinabilité	Resistance a la corrosion Soudabilité

Tableau 6 Influence des éléments d'addition principale

II.8.4.2 Influence des éléments d'addition secondaires

Ils sont résumés dans le tableau suivant : [26]

Elément	Avantage	Inconvénient
Mn	Soudabilité des alliages Al-Mg	
Cr	Diminue la criquabilité au soudage Taille de grain	Trempabilité
Pb, Bi	Coulabilité, usinabilité	
Ni	Caractéristiques a chaud et fluage	
Ti	Affinage de la structure coulée	
Zr	Taille de grain	
Li	Densité plus faible des alliages Module d'élasticité	
Sn	Usinabilité, Antifriction	

Tableau 7 Influence des éléments d'addition secondaires

II.8.4.3 Désignation normalisée des alliages d'aluminium

Les normes NF 02-104 et NF A 02-004 définissent deux systèmes de désignation des alliages d'aluminium qui tous deux font référence à la composition chimique : Un système numérique et un système alphanumérique. [27]

- ❖ Le système numérique : Il met en jeu un code à 04 chiffres et fait référence à la composition. Il est utilisé surtout pour les alliages d'aluminium de corroyages (NF 02-104).
 - Le premier chiffre : Allant de (0 jusqu'à 9), il indique la série ou le groupe d'appartenance, le chiffre (1) pour l'aluminium pur, le chiffre (8) pour des alliages spéciaux et les chiffre (0 et 9) sont réservés à l'usage privé des producteurs d'aluminium.
 - Le second chiffre : Dans le groupe 1 : Il identifie des variantes ou impuretés. Dans les groupes 2 à 8 : Il est réservé aux modifications successives de l'alliage
 - Les deux derniers chiffres : Dans le groupe 1 : Ils indiquent le (%) en aluminium au-delà de 99,00%. Dans les groupes 2 à 8 : Ils servent seulement à identifier l'alliage.

❖ Le système Alphanumérique :

Il permet de distinguer l'aluminium non allié et les alliages d'aluminium. Il est utilisé surtout pour les alliages de moulage (NF A 02-004).

Exemple (A-S13) -Les lettres suivent le A correspondent aux éléments d'additions.

- Ces lettres sont suivies de l'indication numérique de la teneur de l'élément d'addition si celle-ci dépasse 1%.

II.8.5. Alliages de cuivre

Matériaux plutôt chers formant de nombreuses familles d'alliages.

Connus pour un bon comportement en corrosion et une excellente conductibilité. [27]

a) Cuivre pur

Très utilisé en électrotechnique. Très déformable.

Conductibilité record en le purifiant de l'oxygène et l'hydrogène dissous.

- Cuivre électrolytique.
- Cuivre OFHC (oxygen free high conductivity) refondu sous CO (électricité).
- Cuivre désoxydé au Phosphore (plomberie).

b) Laitons

Les laitons sont des alliages de cuivre et de zinc, avec des proportions variant généralement de 55% à 95% de cuivre et de 5% à 45% de zinc. Ils sont appréciés pour leur résistance à la corrosion, leur bonne usinabilité, et leur conductivité électrique élevée, bien que légèrement inférieure à celle du cuivre pur. Les laitons trouvent des applications dans des secteurs variés tels que l'électronique, la robinetterie, les composants mécaniques, les instruments de musique, et la décoration architecturale, grâce à leur combinaison de propriétés mécaniques robustes et esthétiques attrayantes.

c) Bronzes

Contiennent de 2 à 12% d'Etain. Très bonne usinabilité. Résistance meilleure que les laitons.

Très bonne résistance à l'usure et à la corrosion.

Également très utilisés en fonderie. Pompes, coussinets, ressorts...

d) Cupro-Nickels

Contiennent de 10 à 30% de Nickel, parfois additionné de Zinc.

Résistance élevée (Re de 200 à 800 Mpa).

Exceptionnelle résistance à la corrosion. Matériel de chimie, matériel marin, pièces de monnaie...

e) Cupro-nickels

Contiennent de 10 à 30% de Nickel, parfois additionné de Zinc.

Résistance élevée (Re de 200 à 800 Mpa).

Exceptionnelle résistance à la corrosion. Matériel de chimie, matériel marin, pièces de monnaie...

f) Alliages cuivre-béryllium et cuivre-chrome

Alliages à durcissement structural. Re supérieure à 1000 Mpa

Très bonne résistance à la corrosion. Applications aux ressorts à faible module...

II.8.6 Alliages de magnésium

Matériaux de fonderie alliant une légèreté record à de bonnes propriétés mécaniques.

Excellente conduction thermique. Très sensibles à la corrosion.

Carters, petites pièces de véhicules et d'outillage portable, aérospatial, micro-informatique.

Fortement concurrencés par les polymères.

Résistance faible. Carters, petites pièces complexes, horlogerie, boîtiers photo, carburateurs...

Fortement concurrencés par les polymères. [28]

II.8.9 Alliage ferreux

II.8.9.1. Les aciers [29]

Les différentes productions sont classées en :

- Produits longs (ronds, profilés, tubes, rails, fils...)
 - Produits plats (tôles fortes, tôles minces)
- a. Aciers au carbone d'usage général (85% du tonnage).**
- Aciers usuels. (Facilement soudables, tenaces, Re de 150 à 350 Mpa et Rm de 300 à 500 MPa.)
 - Aciers améliorés ou HLE (haute limite d'élasticité), (Re de 300 à 700 Mpa, Rm jusqu'à 1000 Mpa)

b. Aciers spéciaux

- **Aciers pour traitements thermiques.**
Définis par leur composition. Ils contiennent plus de 0.2% de Carbone ainsi que d'autres éléments d'addition pour adapter la trempabilité. Ils entrent dans la fabrication de la plupart des machines : engrenages, ressorts, boulonnerie, arbres, moteurs...
- **Aciers à outils et fortement alliés.**
Ces matériaux ont des applications très spécialisées et atteignent souvent des performances exceptionnelles (outillage de découpe et d'usinage, travail à chaud, cryogénie, moules d'injection, extrudeuses, matrices d'estampage..).
- **Aciers inoxydables.**
Alliages de Fer et d'au moins 13% de Chrome. Ils possèdent une faculté de passivation, apportée par le chrome, dans beaucoup de milieux corrosifs. Celle-ci consiste en la formation d'une très fine couche superficielle d'hydroxydes protecteurs freinant le départ, sous forme d'ions, des atomes

métalliques dans le milieu environnant. Le plus souvent la couche de passivation se forme spontanément.

Les aciers inoxydables forment trois classes assez différentes : les Ferritiques (Cr seul), les martensitiques (Cr et C) et les austénitiques (Cr et Ni).

Leurs performances mécaniques sont très variables (R_e de 150 à 1500 Mpa).

II.9 Conclusion

En conclusion, la théorie des matériaux ductiles constitue un fondement essentiel pour appréhender le comportement des matériaux soumis à des contraintes. Grâce à leur capacité à se déformer plastiquement, ces matériaux non seulement résistent mieux aux chocs et aux variations de charge, mais ils jouent également un rôle crucial dans la sécurité des structures. La compréhension des mécanismes microscopiques, tels que le mouvement des dislocations dans le réseau cristallin, permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'optimiser la conception et l'application de ces matériaux dans des environnements variés.

L'approche multidisciplinaire qui englobe la mécanique, la science des matériaux et la métallurgie favorise l'innovation et le développement de nouveaux alliages et traitements capables d'améliorer encore davantage la ductilité. En intégrant ces connaissances dans le processus de conception, il devient possible de créer des structures plus robustes et fiables, capables de faire face aux défis contemporains et futurs. Ainsi, la théorie des matériaux ductiles ne se limite pas à une simple étude des propriétés mécaniques, mais elle s'inscrit dans une démarche visant à garantir la performance et la durabilité des infrastructures et des dispositifs technologiques dans un monde en constante évolution.

CHAPITRE 3

Partie Expérimentale

III.1 Introduction :

Cette étude vise à analyser les résultats de dureté Vickers et de rugosité de surface de trois matériaux distincts : le XC38, le 42CD4 et l'Al-Cu2Mg. Les mesures de dureté ont été effectuées sur plusieurs points, permettant une évaluation précise des propriétés mécaniques des échantillons. Le XC38 et le 42CD4, tous deux de diamètre 50 mm et de longueur respectivement 150 mm et 100 mm, ont fait l'objet de 12 mesures de dureté Vickers, tandis que l'Al-Cu2Mg, avec les mêmes dimensions que le XC38, a été évalué sur 8 points.

Les rugosités de surface ont également été mesurées sur une plage de 1,5 mm pour chaque matériau, fournissant des données complémentaires sur la qualité de la finition de surface. L'objectif principal de cette recherche est d'exploiter ces données afin d'identifier les relations qui existent entre la dureté et la rugosité, qu'elles soient linéaires ou polynomiales, et d'analyser leur impact sur les procédés d'usinage. En utilisant des méthodes statistiques appropriées, cette étude aspire à dégager des tendances significatives qui pourraient orienter les choix de matériaux et les techniques d'usinage dans des applications industrielles variées.

- Les résultats de la dureté Vickers et de la rugosité de surface des matériaux ci-dessous étudiés auparavant par nos collègues sont exploités et étudiés de façon statistique pour tirer le maximum d'informations sur la nature des liens qui les rassemblent (linéaire ou polynomiale) et leurs influences sur le procédé d'usinage.
 - Les pièces utilisées sont le **XC38** de diamètre $\varnothing 50\text{mm}$ et de longueur 150mm ses duretés Vickers ont été relevées sur 12 points radialement ses rugosités de surface ont été mesurées sur une plage de 1,5mm
 - Le **42CD4** de diamètre $\varnothing 50\text{mm}$ et de longueur 100mm ses duretés vickers ont été relevées sur 12 points radialement ses rugosités de surface ont été mesurées sur une plage de 1,5mm
 - L'**Al-Cu2Mg** de diamètre $\varnothing 50\text{mm}$ et de longueur 150mm ses duretés vickers ont été relevées sur 8 points radialement ses rugosités de surface ont été mesurées sur une plage de 1,5mm

III.2 Résultats obtenus

III.2.1 Matériau : XC38

Influence de la dureté du matériau sur la rugosité de surface en usinage

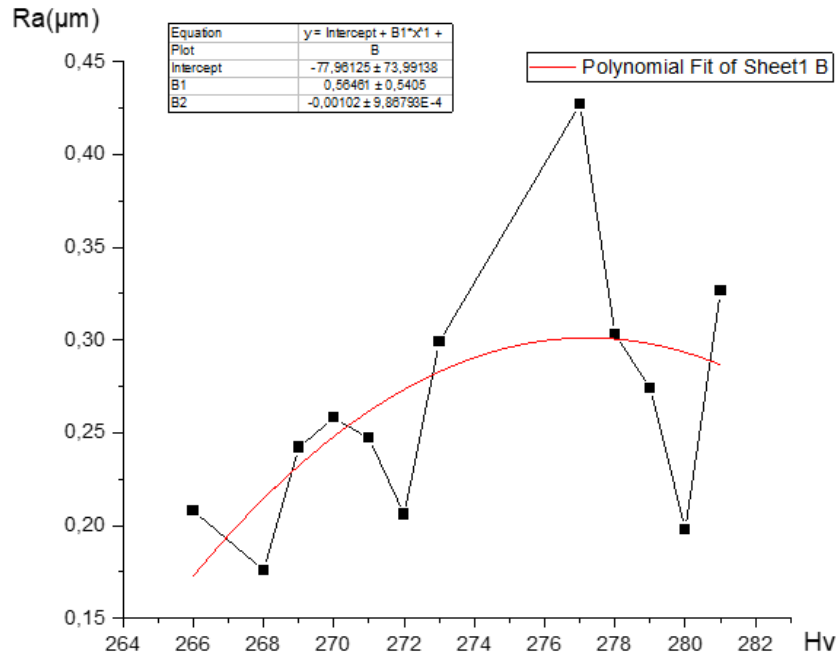


Figure 8 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau XC38.

La rugosité de surface a tendance moyennement à augmenter avec l'augmentation de la dureté cela n'est pas le seul facteur agissant d'après le coefficient de corrélation qui confirme cette hypothèse néanmoins les contraintes résiduelles restent le facteur essentiel pour un contrôle de défauts internes et par conséquent une bonne réponse à la dureté d'un matériau

- Vérification de la normalité de distribution de la dureté (A) et de la rugosité (B)

Normality Test

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	12	0	273,66667	5,12274	1,47881
B	12	0	0,26373	0,06926	0,01999

NormalityTest

Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
A	12	0,93214	0,40333	Can't reject normality
B	12	0,92339	0,31527	Can't reject normality

A: At the 0.05 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 B: At the 0.05 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.

- Coefficient de corrélation R_{xy} (dureté (A) et rugosité (B))

Pearson Correlations

		A	B
A	Pearson Corr.	1	0,50714
	p-value	--	0,0924
B	Pearson Corr.	0,50714	1
	p-value	0,0924	--

2-tailed test of significance is used

III.2.2. Matériau : 42CD4

Influence de la dureté du matériau sur la rugosité de surface en usinage

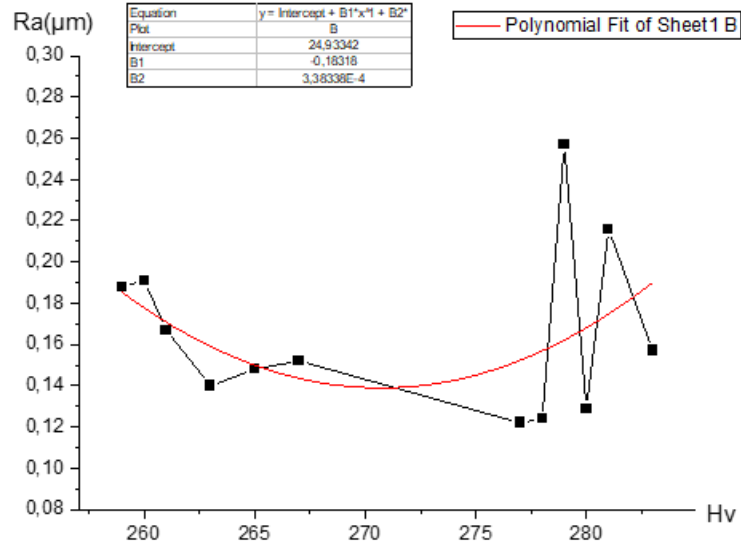


Figure 9 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau 42CD4

La rugosité de surface semble indépendante de la dureté, car la courbe de tendance indique une stabilité légère, suggérant que la dureté n'est pas le facteur principal d'influence. Cela est corroboré par un coefficient de corrélation presque nul. Par conséquent, on peut envisager d'autres facteurs pouvant influencer la variation de la dureté, notamment dans le cas de cet acier faiblement allié.

- Vérification de la normalité de distribution de la dureté (A) et de la rugosité (B)

Normality Test

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	12	0	271,08333	9,31722	2,68965
B	12	0	0,16592	0,04072	0,01175

NormalityTest

Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
A	12	0,85811	0,0463	Reject normality
B	12	0,90649	0,19231	Can't reject normality

A: At the 0.05 level, the data was not significantly drawn from a normally distributed population.
 B: At the 0.05 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.

- Coefficient de corrélation R_{xy} (dureté (A) et rugosité (B))

Pearson Correlations

		A	B
A	Pearson Corr.	1	0,01248
	p-value	--	0,96929
B	Pearson Corr.	0,01248	1
	p-value	0,96929	--

2-tailed test of significance is used

III.2.3 Matériau : Al-Cu2Mg

Influence de la dureté du matériau sur la rugosité de surface en usinage

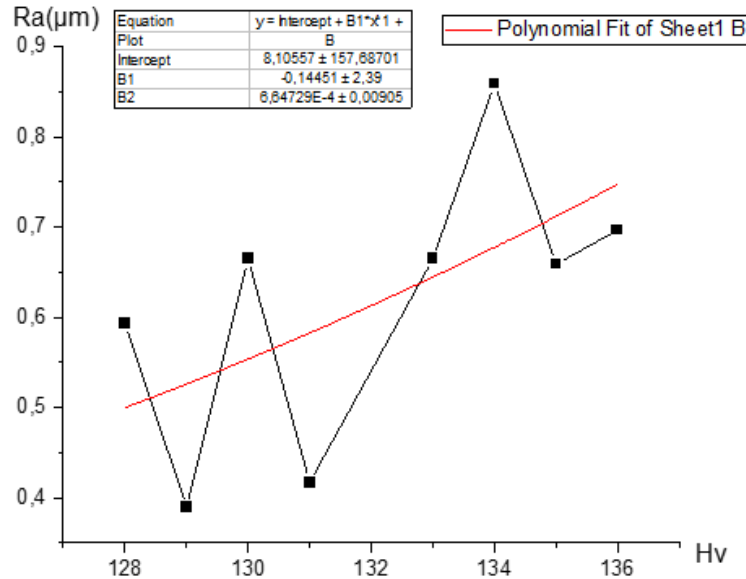


Figure 1 variation de la rugosité (B) en fonction de la dureté de Matériau Al-Cu2Mg

La rugosité de surface a tendance à augmenter avec l'augmentation de la dureté d'une façon bien remarquable la distribution instable de la rugosité dépend de la nature de zone au quelle a été mesurée et aux défauts de surfaces qui peuvent exister

Le coefficient de corrélation valide cette hypothèse par une légère augmentation positive fixant une relation plus ou moins moyenne entre la rugosité de surface et la dureté

Cette conclusion semble être cohérente avec les matériaux utilisés tel notre exemple

L'usinage des matériaux tel que l'aluminium et ses alliages montrent bien cette corrélation entre la rugosité et la dureté

- Vérification de la normalité de distribution de la dureté (A) et de la rugosité (B)

Normality Test

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	8	0	132	2,9277	1,0351
B	8	0	0,61813	0,1528	0,05402

NormalityTest

Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
A	8	0,95047	0,716	Can't reject normality
B	8	0,9083	0,34226	Can't reject normality

A: At the 0.05 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.
 B: At the 0.05 level, the data was significantly drawn from a normally distributed population.

- Coefficient de corrélation Rxy(dureté (A) et rugosité (B))

Pearson Correlations

		A	B
A	Pearson Corr.	1	0,59366
	p-value	--	0,12077
B	Pearson Corr.	0,59366	1
	p-value	0,12077	--

2-tailed test of significance is used

III.3 Régression linéaire entre le facteur rugosité et dureté

La régression linéaire existe s'il y a une relation asymétrique entre la rugosité et la dureté Cette relation est traduite par une équation de la droite de régression sous forme de :

$$Y = aX + b$$

Ou Y représente la rugosité de surface et X la dureté du matériau

a et b deux paramètres dont les expressions :

$$a = \frac{\text{cov}(X, Y)}{v(X)}$$

$$b = \bar{Y} - a\bar{X}$$

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k X_i \cdot Y_i - \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k \frac{X_i}{N} \quad ; \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i}{N}$$

a) Matériau : XC38

L'équation de la droite de régression dans le cas XC38 s'écrit :

$$Y = 9.1769 \times 10^{-3} X - 2.2477$$

Il existe une régression linéaire assez moyenne avec $R_{xy} = 0,507$

b) Matériau : 42CD4

L'équation de la droite de régression dans le cas de 42CD4 s'écrit :

$$Y = 5.4541 \times 10^{-5} X + 0.24897$$

Cela veut dire que la rugosité Y ne dépend pas de la dureté X pas de régression linéaire

Confirmé par le coefficient de corrélation presque nul $R_{xy} = 0,012$

c) Matériau : Al-Cu2Mg

L'équation de la droite de régression dans le cas de Al-Cu2Mg s'écrit :

$$Y = 3.0983 \times 10^{-2} X - 3.4716$$

Il existe une régression linéaire assez moyenne confirmé par le coefficient de corrélation linéaire $R_{xy} = 0,593$

III.4. Conclusion

L'analyse des propriétés mécaniques des matériaux a révélé des résultats significatifs concernant la distribution de la dureté et la rugosité de surface. Tout d'abord, il est important de noter que la distribution de la dureté suit la loi normale (loi de Gauss) pour l'acier fortement allié, ainsi que pour l'alliage d'aluminium utilisé dans cette étude. Cela indique une homogénéité dans la distribution des propriétés mécaniques de ces matériaux, ce qui est essentiel pour garantir leur performance dans des applications industrielles.

En revanche, la distribution de la dureté pour l'acier faiblement allié ne suit pas la loi normale, ce qui suggère des variations plus marquées et potentiellement des zones de faiblesse ou des hétérogénéités dans ce type de matériau. Cela mérite une attention particulière lors de la sélection et de l'utilisation de l'acier faiblement allié dans des applications critiques.

Concernant la rugosité arithmétique de surface, il a été observé qu'elle suit la loi normale pour tous les aciers et l'alliage d'aluminium utilisés, avec un niveau d'erreur $\alpha = 0,05$. Cela souligne une uniformité dans la finition de surface des matériaux, ce qui est un facteur clé pour assurer une bonne performance lors de l'usinage et du fonctionnement en service.

Une relation linéaire a également été identifiée entre la dureté et la rugosité des matériaux, bien que cette relation soit qualifiée de « plus ou moins moyenne ». Cette corrélation est influencée par les contraintes résiduelles générées lors de la mise en forme du brut, notamment en raison des gradients de température de refroidissement. Cela souligne l'importance de prendre en compte les conditions de traitement lors de l'évaluation des propriétés mécaniques.

Enfin, la régression linéaire réalisée dans le cadre de cette étude a confirmé que d'autres facteurs influencent également la dureté du matériau. Ces résultats mettent en évidence la complexité des interactions entre la microstructure, les conditions de fabrication et les

propriétés mécaniques, suggérant qu'une approche multidisciplinaire est nécessaire pour optimiser les performances des matériaux dans des applications industrielles variées.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, cette étude met en lumière l'importance cruciale de l'analyse statistique de la dureté et de la rugosité des matériaux, en se concentrant sur trois matériaux représentatifs : les aciers XC38 et 42CD4, ainsi que l'alliage d'aluminium ALCu2Mg. Ces propriétés mécaniques sont fondamentales pour garantir la performance et la durabilité des composants dans des secteurs variés tels que l'aéronautique, l'automobile et la construction, où des exigences strictes en matière de résistance et de fiabilité sont de mise.

L'exploration approfondie de la distribution de la dureté et de la rugosité, menée à l'aide de méthodes statistiques avancées telles que l'analyse de variance, les tests de normalité et les techniques de régression, a permis d'obtenir des insights significatifs sur le comportement de ces matériaux. Les résultats montrent que, bien que la dureté et la rugosité puissent présenter des corrélations, d'autres facteurs, tels que la composition chimique, la microstructure et les conditions de traitement, influencent également leur variation. En particulier, pour les aciers faiblement alliés comme le XC38 et le 42CD4, ces facteurs peuvent jouer un rôle déterminant dans les performances mécaniques, ce qui souligne l'importance d'une approche intégrée lors du choix des matériaux.

De plus, cette étude a révélé que la rugosité de surface peut ne pas être un indicateur fiable de la dureté, ce qui appelle à une réflexion sur les méthodes d'usinage et de finition utilisées. En effet, une meilleure compréhension des interactions entre dureté, rugosité et techniques d'usinage pourrait conduire à des optimisations dans les processus de fabrication, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité et la rentabilité.

Ces données, essentielles pour les ingénieurs et les concepteurs, offrent une base solide pour optimiser les performances des composants fabriqués à partir de ces matériaux. En soutenant des décisions éclairées en matière de conception et de fabrication, cette étude contribue à améliorer la fiabilité des produits dans des environnements industriels exigeants. De plus, elle ouvre la voie à de futures recherches, notamment sur l'exploration de matériaux alternatifs, l'impact de traitements de surface ou l'utilisation de techniques de fabrication avancées. Ces investigations pourraient enrichir notre compréhension des

relations complexes entre microstructure, propriétés mécaniques et performance en service, renforçant ainsi le développement de solutions innovantes dans le domaine de l'ingénierie des matériaux.

Références Bibliographiques

[1] Pierre Dagnelie, « Diversité et unité de la statistique », journal de la société statistique de Paris, 1982.

[2] : J. Torrens-Ibern, « Variété. Qu'est-ce que la statistique? », journal de la société statistique de Paris, vol. 1956.

[3] : Benchikh Tawfik, Faculté de Médecine, UDL, SBA 1ère année Médecine statistique descriptive 19 Septembre 2018.

[4] : DIP, Paramètres de position d'une série statistique, Cours 3 page, Université Stendhal. Grenoble III.

[5] : DIP, Paramètres de dispersion d'une série statistique, Cours 4 page1 et 3 Université Stendhal Grenoble III.

[6] : Jean-Christophe breton, statistique IUT biotechnologie version 04 octobre 2008.

[7]: Catalogue sandvik coromant. outils de tournage, outils rotatif, 2017.

[8] : Jobs, Analyse de Corrélation Université Lumière Lyon date/time:27-Dec-2017/1:55.

[9] : Dr : BENSALD Nasreddine Polycopié Pédagogique Statistiques et Probabilités Cours et exercices corrigés

[10] V. Le Corre : 'Etude de la competitiondechirure ductile / rupture fragile : application a la tenuemecanique des tubes en acier C-Mn et de leurs joints soudés', Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Septembre 2006.

[11] : Guide de Dessinateur Industriel « Chevalier », édition 2004.

[12] BENSADA Said "Cours CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES", Université Mohamed KHIDER – Biskra.

[13] : TAÂMALLAH Ouahiba, Effet des traitements mécaniques de surfaces sur l'érouissage et la ténacité d'un acier, Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, année 2012.

[14] Document usine N°3, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai

[15] document internet Wikipédia, dureté des matériaux,[http://wikipedia.org/wiki/fichier\[de dureté – ISO 409/1\(1982\)](http://wikipedia.org/wiki/fichier[de dureté – ISO 409/1(1982))

[16] A. Fadel, « Influence des diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique », Diplôme de magister, Université sétif1, 2014, p106.

[17] N. T. Doyen, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003, p133.

[18] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir 1975.

[19] A. Brosse, F. Valiorgue, H. Hamdi, J. Rech, J-M. Bergheau, Une nouvelle approche des conséquences thermomécaniques induites par les procédés d'usinage : application à la rectification et au tournage, CFM, 2007.

[20]: M. Meiller, J. L. Lebrun, M. Touratier, D. Ryckelynck, « Friction law for tool Work piece contact area in dry machining, Proceedings of the International Workshop on Friction and Flow Stress in Cutting and Forming », ENSAM-Paris (France), (2000) 101–109.

[21]: B. Vielle, méthode et fabrication, conservatoire national des arts et métiers.

[22]: Equipe procédé de fabrication-GMC, usinage par outil coupant, institut national des sciences appliquées, Lyon.

[23]: Catalogue sandvik coromant. Outils de tournage, outils rotatif, 2017.

[24] : M. Colombie et all : Matériaux industriels, Matériaux métalliques. (propriété chimique)

[25] Précis Métallurgie : Elaboration, Structures-Propriétés, Normalisation.

[26] Hervé Gransac : l'usinage de la mécanique par laboratoire de la métallurgie à Orléans

[27] Roger Develay propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés alliages de la série (2000)

[28] Frédéric GONZALES : Etude des morphologies de solidification dans les alliages Aluminium, thèse Doctorat, école polytechnique Fédérale de Lausanne-Suisse.

[29] Y. Aouabdia. Mémoire de magister. Université de Constantine (2005).

Résumé

L'étude examine la distribution de la dureté et de la rugosité pour trois matériaux métalliques : l'acier XC38, l'acier 42CD4, et l'alliage d'aluminium ALCu2Mg. Les résultats montrent que la dureté suit une loi normale pour l'acier 42CD4 et l'alliage d'aluminium, mais pas pour l'acier XC38. La rugosité arithmétique suit également une loi normale pour tous les matériaux. Une relation linéaire modérée entre la dureté et la rugosité est observée, influencée par les contraintes résiduelles formées lors du processus de mise en forme initiale. Enfin, la régression linéaire confirme que d'autres facteurs influencent la dureté des matériaux en dehors de la rugosité. Cette étude approfondie met en lumière la variabilité des propriétés mécaniques et de surface des matériaux étudiés.

Abstract:

The study examines the distribution of hardness and roughness for three metallic materials: XC38 steel, 42CD4 steel, and ALCu2Mg aluminum alloy. The results show that the hardness follows a normal law for the 42CD4 steel and the aluminum alloy, but not for the XC38 steel. Arithmetic roughness also follows a normal law for all materials. A moderate linear relationship between hardness and roughness is observed, influenced by residual stresses formed during the initial shaping process. Finally, linear regression confirms that other factors influence the hardness of materials apart from roughness. This in-depth study highlights the variability in the mechanical and surface properties of the materials studied.

المخلص

تناولت الدراسة توزيع الصلابة والخشونة لثلاث مواد معدنية: الفولاذ XC38، الفولاذ CD442، وسبائك الألمنيوم ALCu2Mg. تظهر النتائج أن الصلابة تتبع القانون الطبيعي للفولاذ CD442 وسبائك الألمنيوم، ولكن ليس للفولاذ XC38. وتتبع الخشونة الحسابية أيضاً قانوناً عادياً لجميع المواد. وقد لوحظ وجود علاقة خطية معتدلة بين الصلابة والخشونة، متأثرة بالضغوط المتبقية التي تشكلت أثناء عملية التشكيل الأولية. وأخيراً، يؤكد الانحدار الخطي أن هناك عوامل أخرى تؤثر على صلابة المواد باستثناء الخشونة. تسلط هذه الدراسة المتعمقة الضوء على التباين في الخواص الميكانيكية والسطحية للمواد التي تمت دراستها.