

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département: Génie mécanique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Génie des matériaux

Intitulé

**Application des plans d'expérience pour l'optimisation des
processus de trempe u dans l'industrie de l'acier.**

Présenté par :

Mr: BENADDA YAHIA

Mr : BENAMARA NADJIB

Devant les membres de jury :

Président : Mr : FELLAH AHMED

Maître de conférences (B) (U.Relizane)

Encadreur : Mr : CHAOUCH DJAMEL

Maître de conférences (A) (U.Relizane)

Examineur : Mme :BELGACEM SOUAD

Maître de conférences (B) (U.Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

*Nos remerciements en premier lieu **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Nos remerciements vont également à monsieur **Chaouch Djamel** pour son encadrement attentif et ses conseils avisés qui ont été d'une grande aide dans l'élaboration de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury Mme **BELGACEM SOUAD** et Monsieur **FELLAH AHMED** qui me font l'honneur d'examiner ce travail.*

Nous adressons également nos remerciements tous mes enseignants du département de génie mécanique de l'Université de Relizane.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide et leurs conseils tout au long de notre parcours d'études à l'université de Relizane.

DEDICACES

Je dédie ce travail à mon père, ma mère, ma sœur,

Mes grand-mères,

Mes oncles,

Mes enseignants,

Mes camarades,

Mes amis du département de génie mécanique,

Tous mes amis à l'université, et à toute personne qui m'a aidé tout au long de mon parcours universitaire.

À mon encadrant Dr. Chaouch Djamel, pour ses nombreux conseils qui ne m'ont jamais fait défaut. Je suis heureux de lui exprimer ici ma respectueuse reconnaissance tout au long de ce travail

BEAMARA NADJIB

DEDICACES

Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux,
À ceux qui, après Dieu, ont été les piliers de mon parcours académique,

À mes chers parents,

qui ont été mon soutien et mon appui à chaque étape,
je vous dédie ce travail en signe de ma profonde gratitude pour vos sacrifices et
vos prières constantes.

À mon honorable professeur, Monsieur Chaouch,

qui n'a ménagé aucun effort pour me guider et m'orienter,
et dont le savoir et les conseils ont grandement contribué à l'aboutissement de
ce mémoire,
je vous dédie ce travail en reconnaissance de vos efforts précieux.

À mes estimés enseignants,

qui ont été des flambeaux illuminant mon chemin,
je vous dédie ce travail en témoignage de ma reconnaissance pour le savoir et
la connaissance que vous m'avez transmis.

À mes camarades d'études,

qui ont partagé avec moi le voyage de l'apprentissage,
et ont été pour moi un soutien et un appui,
je vous dédie ce travail en remerciement pour votre compagnie et votre
soutien.

À tous ceux qui ont contribué à me soutenir et m'encourager tout au long de
mon parcours académique,
je vous dédie ce travail en signe de ma gratitude et de mon estime

BENADDA YAHIA

ملخص

الفولاذات السبائكية تتميز بخصائص ميكانيكية مهمة ومقاومة جيدة للتآكل، وهذا ما يفسر استعمالها الواسع في مختلف مجالات الصناعة.

في هذا العمل، حاولنا دراسة تأثير سرعة التبريد، وقت البقاء في درجة الحرارة، ودرجة حرارة الأوستنة على البنية المجهرية وخصائص الصلادة لفولاذ 42CrMo4، باستخدام منهجية تخطيط التجارب.

كلمات مفتاحية :

فولاذ غير قابل للتأكسد، التبريد، معالجة حرارية، منهجية تخطيط التجارب

Abstract

Alloy steels have interesting mechanical properties and a good resistance against corrosion; this what can explain their large use in different parts of industry.

In this work, we aimed to study the effect of cooling rate, holding time, and austenitizing temperature on the microstructure and hardness properties of 42CrMo4 steel using the design of experiments (DOE) methodology.

Key words:

Alloy steels, quench, heat treatment, design of experiments methodology.

.

Résumé

Les aciers alliés sont des matériaux ayant des propriétés mécaniques et physiques intéressantes et une résistance à la corrosion exceptionnelle, d'où leurs utilisations très variées dans différents secteurs de l'industrie.

Nous avons essayé, à travers ce travail d'étudier l'effet de la vitesse de refroidissement, le temps de maintien et la température d'austénisation sur la microstructure et les propriétés de dureté de l'acier 42CrMo4 en utilisant la méthode plans d'expérience.

Mots clés :

Acier allié, trempe, traitement thermique, plans d'expérience.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Acier et le traitement thermique

I.1 Acier.....	2
I.2 Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	2
I.3 Types d'aciers.....	4
I.4 Propriétés des matériaux	6
I.4.1 Les propriétés générales des matériaux	6
I.4.2 Les propriétés mécaniques des matériaux.....	6
I.5 Caractérisation mécanique des matériaux	8
I.6 Composition des aciers.....	8
I.6.1 Influence des éléments d'addition sur l'es aciers.....	8
I.7 Métallurgie de l'acier.....	10
I.7.1 Ferrite	10
I.7.2 Perlite.....	11
I.7.3 Austénite.....	12
I.7.4 Martensite.....	12
I.7.5 Bainite	13
I.8 Traitements thermiques des aciers.....	13
I.8.1 La trempe d'un acier faiblement allié	14

Chapitre II : Plans d'expérience

II.1 Applications des Plans d'Expérience dans l'Industrie Métallurgique.....	20
II.2 Objectifs de l'analyse statistique	20
II.3 Les différents plans d'expériences	21
II.3.1 Le plan factoriel complet.....	21
II.3.2 Le plan factoriel fractionnaire	23

II.4 Notion de la modélisation mathématique	23
II.4.1 Codages des facteurs	24
II.4.2 Notion d'espace expérimental et terminologie.....	25
II.4.3 Le facteur	25
II.4.4 La réponse	26
II.5 Analyse de régression.....	27

Chapitre III : Essai de dureté –Résultats et discussions

III.1 Essai de dureté	31
III.1.1 Essai Vickers.....	31
III.2 Matériau étudié	33
III.3 Traitements thermiques étudié.....	34
III.4 Analyse statistique	34
III.4.1 représentation graphique et discussion	38
Conclusion générales et recommandation.....	43

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie de l'acier est un pilier fondamental de l'économie mondiale, jouant un rôle dans divers secteurs tels que la construction, l'automobile et les infrastructures. Les traitements thermiques, notamment la trempe et le revenu, sont essentiels pour améliorer les propriétés mécaniques des aciers, telles que la dureté et la résistance à l'usure. Toutefois, l'optimisation de ces processus reste un défi majeur en raison de la complexité des interactions entre les paramètres de traitement.

De nombreuses études ont montré l'efficacité des plans d'expérience pour l'optimisation des traitements thermiques. Par exemple, des recherches ont démontré comment l'ajustement des paramètres de trempe et de revenu peut améliorer la dureté et la résistance à l'usure des aciers. Les plans d'expérience sont des outils statistiques utilisés pour étudier les effets de plusieurs variables simultanément tels que la température d'austénisation, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement (eau, l'huile...). Ils permettent d'optimiser les processus en identifiant les interactions et les effets principaux des variables. Parmi les types couramment utilisés figurent les plans factoriels complets et fractionnaires.

L'objectif de ce présent travail est de voir l'influence des paramètres de cycle thermique sur la dureté de l'acier allié 42CrMo4 et de mettre à la disposition des utilisateurs d'un ensemble de modèles mathématiques simples à caractère prédictif des propriétés essentielles du matériau.

Ce travail que nous présentons est divisé en trois chapitres :

- ❖ premier chapitre présente une analyse bibliographique.
- ❖ Deuxième chapitre présente l'efficacité des plans d'expérience pour l'optimisation des traitements thermiques.
- ❖ Un troisième chapitre est consacré à étudier et interpréter des résultats obtenus en 2019 en utilisant la méthode des plans d'expérience.
- ❖ Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre

I

I.1 Acier

L'acier est un matériau ferreux qui se distingue à la fois du fer et de la fonte. C'est un alliage métallique dont l'élément chimique principal est le fer et dont l'autre élément essentiel est le carbone.

L'acier est un alliage résultant d'une transformation de matières premières naturelles, tirées du sol ou recyclées. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent la présence dans sa composition d'une faible proportion d'autres éléments (phosphore, soufre) considérés comme des impuretés.

Suivant la qualité d'acier que l'on veut obtenir, il est possible d'abaisser le pourcentage de ces impuretés au cours de l'élaboration, ou au contraire de l'augmenter pour obtenir des propriétés particulières. L'acier peut également contenir d'autres éléments issus de son élaboration ou ajoutés volontairement, en vue d'ajuster sa composition chimique, et par conséquent, ses caractéristiques mécaniques. Les aciers ont une teneur en carbone est comprise entre environ 0,005 % et 1,5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 %. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2%, mais cette valeur de 2% est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte [1].

I.2 Diagramme d'équilibre fer-carbone

Avant d'examiner les principaux diagrammes d'équilibre des aciers, il est nécessaire de rappeler les variétés allotropiques de l'élément de base qui entre dans la composition de l'acier à savoir le fer pur est cela par le biais du diagramme d'équilibre fer-carbone [1-3].

Le fer existe sous les variétés allotropiques représentées par la figure I.1.

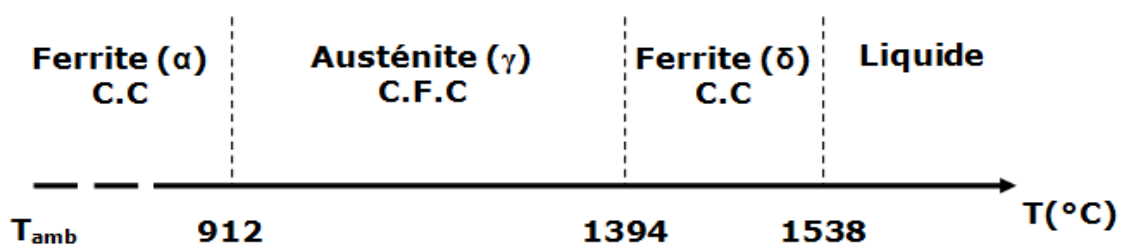


Figure I.1: variétés allotropiques du fer pur

- À des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : c'est le Fer α . Ce dernier ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02%C au maximum à 723°C , moins de 0.01%C à 300°C .

- À des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C (A4) le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : c'est le Fer γ .
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer α : c'est le Fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer α (0.07%C au maximum à 1493°C).
- Jusqu'à 768°C (A2) point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique.

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone (figure I.2) est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Au-dessus de 2,11% de carbone on parle de fontes, en dessous de cette concentration on parle d'acier. Ce diagramme permet de visualiser les phases d'acier selon la température et la teneur en carbone [3].

Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent l'élargissement de la phase γ (éléments gammagènes) et certains autres favorisent le cas inverse (éléments alphagènes). Il existe deux diagrammes fer-carbone, car il existe du carbone à l'état libre (graphite), et du carbone en combinaison chimique (cémentite). Il y a donc un diagramme fer-graphite (dit diagramme stable) et un diagramme fer-cémentite (dit diagramme métastable).

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme.

Ligne A_1 (723 °C) : elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,83 %C, en austénite ; au dessus de 723 °C la perlite n'existe plus.

Ligne A_3 : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite ; la ferrite n'existe plus au dessus de cette ligne.

Ligne A_{cm} : elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

Symboles A, r et c : ils sont normalisés, aux normes internationales. Le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage.

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone et la structure cristallographique qu'ils contiennent :

- les aciers hypoeutectoides (de 0,008 à 0,8 % de carbone) qui sont les plus doux, ils sont composés de ferrite et de perlite;
- les aciers eutectoïde (0,8% de carbone), ils sont composés de perlite (structure lamellaire);

- les aciers hypereutectoides (de 0,8 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs, ils sont composés de perlite et de cémentite.
- les aciers ferritiques, qui ont une structure cristalline cubique centrée (fer α);
- les aciers austénitiques, qui ont une structure cristalline cubique à faces centrées (fer γ ou austénite);
- les aciers martensitiques, qui contiennent des aiguilles de carbures (martensite).

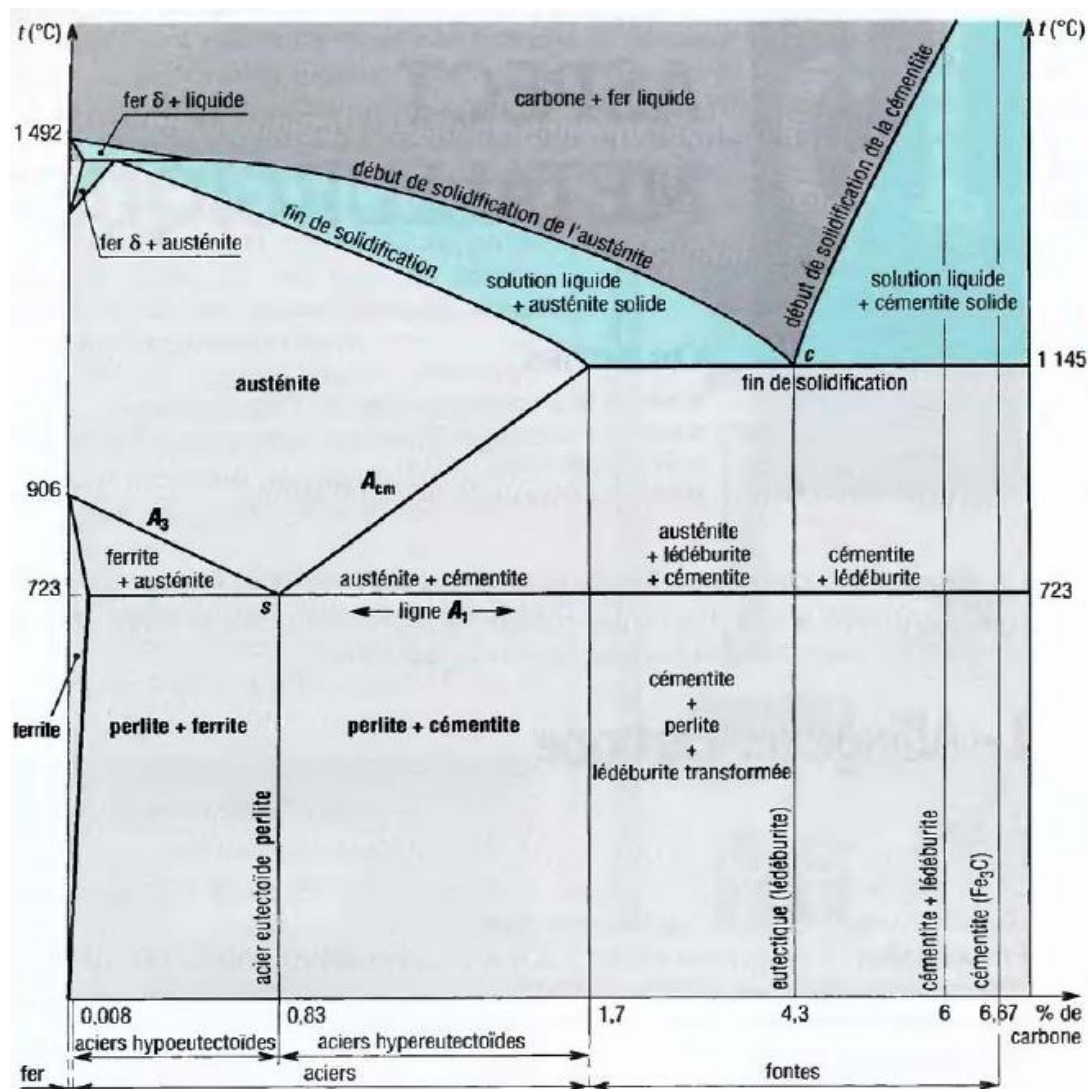


Figure I.2: Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des phases d'acier.

I.3 Types d'aciers

Les aciers sont classés en quatre catégories principales selon la norme européenne EN 10027 [4] :

- Les aciers non-alliés d'usage général (construction), dits « aciers à ferrer les ânes ».
- Les aciers non-alliés spéciaux : sont utilisés pour les traitements thermiques, malléables, soudables, forgeables, ...

- Les aciers faiblement alliés: ce sont des aciers pour traitements thermiques (dans la teneur de chaque élément d'addition est $<5\%$ et $<1\%$ pour le Mn). les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, et les roulements, etc.
- Les aciers fortement alliés :
 - Les aciers inoxydables.
 - Les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forêts.

On classe les aciers en prenant pour critère, soit l' emploi (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique), soit la composition chimique (aciers au carbone, aciers faiblement et fortement alliés), soit la structure notamment pour les aciers inoxydables (austénitiques, austeno-ferritiques, martensitiques, ferritique), soit encore les traitements thermiques (trempe, cémentation, nitruration), soit même les applications spécifiques (réfractaires, résistants à l'usure, aciers a outils pour roulements, pour ressorts) [4-6].

Pour la classification par l'emploi, la désignation commence par la lettre S pour les aciers d'usage général et par la lettre E pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de la limite d'élasticité en MPa par exemple : S220; E350.

Pour la classification par composition chimique ; la désignation des aciers non alliés se compose de la lettre C suivie du pourcentage de la teneur moyenne en carbone multiplié par 100. S'il s'agit d'un acier moule la désignation est précédée de la lettre G. Dans les aciers faiblement alliés, aucun élément d'addition ne dépasse 5% et la teneur en carbone multiplié par 100. Suivi des symboles chimiques caractérisant les éléments d'addition par ordre de teneur décroissante. Ces symboles sont suivis par la teneur en % de chacun des éléments multipliés par un facteur dépendant de l'élément. Par contre, dans les aciers fortement alliés, un élément d'addition au moins dépasse 5%. La désignation se compose de symbole X suivi de la teneur en carbone multiplié par 100. Suivent des symboles chimiques caractérisant les éléments d'addition par ordre de teneur décroissante. Ces symboles sont suivis par la teneur en % de chacun des éléments.

Les aciers de traitements thermiques sont définis par leur composition chimique. Celle-ci détermine le type de traitement qu'on peut leur appliquer. Les aciers de traitement thermique sont soit des aciers au carbone, soit des aciers alliés contenant en proportions variables, un ou

plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, Mo, V, ...) comme par exemple C 32, 35 Ni Cr Mo 16, 20 Ni Cr 6, 16 Ni Cr 6.

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion. Ce sont des aciers alliés au nickel et au chrome. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2% de carbone. On distingue selon leurs structures : aciers inoxydables ferritiques et martensitiques, aciers inoxydables austénitiques et aciers inoxydables austéno-ferritiques.

I.4 Propriétés des matériaux

I.4.1 Les propriétés générales des matériaux

- *Densité*

La densité ρ (kg.m^{-3}) est égale au rapport de la masse par le volume correspondant.

- *Coût*

Le coût C_m ($\text{\$/kg}^{-1}$). Le prix d'un matériau est établi à 3 niveaux : celui des fabricants, celui des distributeurs et celui des détaillants. Il varie selon la quantité commandée, le procédé utilisé pour sa fabrication, sa dimension et sa forme.

I.4.2 Les propriétés mécaniques des matériaux

- *Modules d'élasticité*

Ils sont définis en (GPa ou GN/m^2) comme la pente de la partie élastique linéaire de la courbe contrainte-déformation [6-8]. :

- le module d'Young E : décrit le comportement en traction et en compression
- le module de cisaillement G : décrit le comportement en cisaillement
- le module de compressibilité K : décrit l'effet d'une pression hydrostatique
- le coefficient de Poisson ν (sans dimension) : rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale dans un essai de traction uniaxial.

Dans un matériau isotrope, les modules sont liés entre eux par les équations suivantes:

$$E = \frac{9K \cdot G}{G + 3K} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Un matériau dont le module d'élasticité est élevé est dit rigide. Il est élastique dans le cas contraire.

L'élasticité d'un matériau est définie par son module d'élasticité. C'est une grandeur intrinsèque du matériau, définie par le rapport de la contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte. La déformation est exprimée comme une grandeur sans dimension.

- **Résistance mécanique**

La définition de cette grandeur σ_f (en MPa ou N/mm²) nécessite de faire la distinction entre les familles de matériaux (figure I.3).

- **pour les métaux :**

Contrainte associée à une déformation plastique de 0,2%. C'est la contrainte à laquelle les dislocations commencent à parcourir des grandes distances, et elle est identique en traction et en compression.

- **pour les polymères :**

Contrainte pour laquelle la courbe devient clairement non linéaire (typiquement 1% de déformation).

- **Pour les céramiques et verres :**

La résistance, pour les céramiques et verres, dépend fortement du mode de chargement. La résistance en traction R_{mt} est bien moins importante que celle en compression R_{mc} , et on a :

$$R_{mc} = (10 \text{ à } 15) * R_{mt}$$

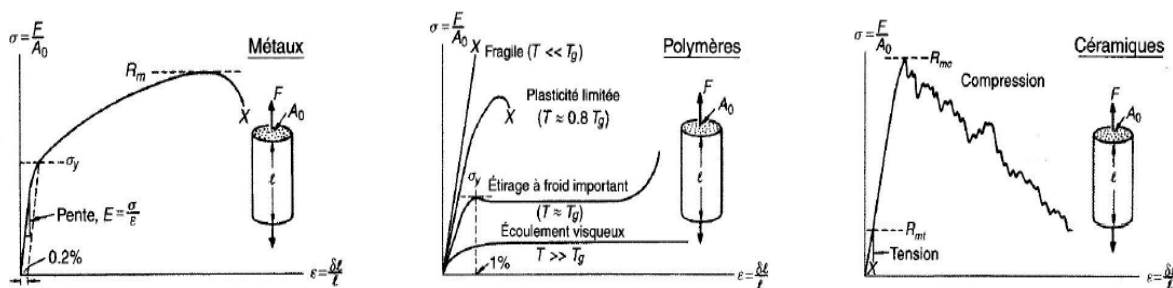


Figure I.3: Courbe contrainte-déformation de différents types de matériaux.

- **Résistance à la traction**

C'est la contrainte nominale R_m (MPa) à laquelle une éprouvette cylindrique du matériau, chargée en traction, se casse. Elle est supérieure à la limite d'élasticité d'un facteur compris entre 1,1 et 1,3 du fait de l'écrasement. Pour **les matériaux fragiles** (céramiques, verres et polymère non ductiles) : elle se confond avec la limite d'élasticité.

- **Dureté**

La dureté caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures,...), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell), mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai

Shore). Grandeur caractéristique : dureté H en N.mm^{-2} ou MPa (HB, HV ou HR selon l'échelle utilisée).

▪ *Ténacité*

L'énergie de rupture G_c (en kJ.m^{-2}) et la ténacité K_c (en $\text{MPa.m}^{1/2}$) expriment la résistance du matériau à la propagation d'une fissure. On mesure la ténacité en chargeant une éprouvette dans laquelle on a fait une fissure de longueur $2c$ et en enregistrant la contrainte σ_c pour laquelle la fissure se propage, et on a les relations suivantes [8]:

$$Kc = Y\sigma_c\sqrt{\pi C}$$

I.5 Caractérisation mécanique des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont définies à partir d'essais Mécaniques normalisées ; Chacun de ces essais reprenant à son compte une ou plusieurs caractéristiques mécaniques [9, 10].

Les caractéristiques d'un matériau vont permettre de le classer en différentes catégories pour pouvoir le choisir le Moment venu.

Les critères de choix sont :

- Légèreté
- Résistance / Fragilité
- Dureté superficielle
- Durée de vie / fatigue ...

I.6 Composition des aciers

En fait, les aciers sont des alliages fer-carbone contenant du silicium, manganèse, soufre et phosphore en quantité faible pour la famille des aciers non alliés. Des additions judicieuses d'éléments, comme le Si, Ni, Mo, Cr,... au cours de l'élaboration ou du traitement de l'alliage liquide permettent de modifier le comportement à la solidification et aussi d'ouvrir l'éventail des structures obtenues [10, 11]. Cette catégorie d'aciers faiblement ou fortement alliés offre une gamme de performances mécaniques, physico-chimiques, électriques,... assez considérable. De plus, ces matériaux se prêtent bien aux traitements thermiques, ce qui permet encore d'en diversifier les performances.

I.6.1 Influence des éléments d'addition sur les aciers

▪ **Influence du carbone (C)**

Le carbone est un élément de base dans un alliage ferreux, gammagène, il joue un rôle important. C'est un élément qui participe activement à la formation des carbures à grand pouvoir abrasif. Il en résulte que l'augmentation de la teneur en carbone accroît, la dureté, la

charge à la rupture et la limite élastique, par contre l'allongement, la striction et la résilience diminuent.

- **Influence du chrome (Cr)**

Le chrome a une grande affinité pour le carbone avec lequel il donne des carbures plus durs que la cémentite (Fe_3C). Aussi, il accroît la dureté, la résistance à la traction et la résistance à l'usure, mais sans augmenter la fragilité. Le chrome augmente la résistance à l'adoucissement lors du revenu [11].

- **Le nickel**

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité.

Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique [10].

- **Effet du molybdène (Mo)**

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M_6C –1500HV, M_2C – 2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. Les propriétés du molybdène sont comparables à celles du tungstène. Il se place souvent dans la même composition chimique avec le chrome. Il élève la résistance à la traction et à la fatigue, augmente la dureté et la trempabilité, tout en diminuant l'allongement et la forgeabilité, de plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Sa présence conduit à la formation de petites particules résistantes à l'abrasion et évite le grossissement des grains austénitiques à haute température.

- **Effet du silicium**

Le silicium est un élément alphagène et un désoxydant, permet également d'améliorer la trempabilité de l'alliage et accroît la résistance à l'usure abrasive. La trempabilité est l'aptitude d'un acier à se transformer en martensite dans la masse d'une pièce. Grâce à cette propriété, on peut augmenter la dureté après traitement thermique d'un acier. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une augmentation de dureté se fait très souvent au détriment de la ductilité. Il améliore la résistance à l'oxydation des aciers au chrome.

- **Effet du manganèse**

Le manganèse est un élément désoxydant et désulfurisant, tout comme le silicium, il augmente la trempabilité d'un acier et élève à la fois la limite d'élasticité et la ténacité. L'apport de manganèse fait décroître la conductivité thermique de l'acier le contenant, ce qui peut être un atout ou une faiblesse en fonction de l'utilisation voulue. Il se combine au soufre.

▪ Effet du titane

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome [10].

I.7 Métallurgie de l'acier

Dans les aciers, les transformations de phase au refroidissement à partir de la phase austénitique sont de deux types : les transformations diffusionnelles conduisant généralement à la formation de ferrite et de carbures et les transformations martensitiques [10, 11]. Le mécanisme physique mis en jeu lors de la formation de ces nouvelles phases dépend de la température à laquelle la transformation est amorcée et celle-ci est fonction de la vitesse de refroidissement : plus la vitesse de refroidissement est élevée, plus la température de transformation est basse (Figure I.4).

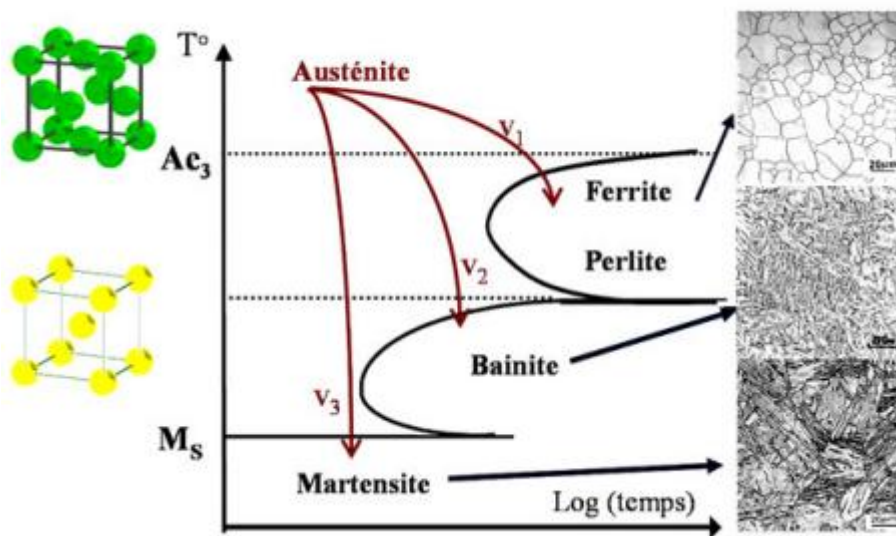


Figure I.4 : Transformations structurales dans les aciers (Schéma d'un diagramme TRC type d'un acier bas carbone avec une courbe en C distincte pour la transformation bainitique)

I.7.1 Ferrite

C'est une solution solide de carbone dans le fer α (structure cubique centrée). C'est du fer pratiquement pur qui ne contient que des traces de carbone (0.008%) à température ambiante. Sa solubilité maximale est de 0.02% à 727°C.

Après attaque au Nital, elle se présente sous forme de polyèdres blancs dont les joints de grains apparaissent en foncé. Elle est très ductile ($A\%=35\%$ après rupture), peu tenace ($R_m = 300\text{N/mm}^2$) et de dureté faible ($HV : 80 \text{ à } 100$). Au point de vue métallographique, la solution ferritique présente deux structures: globulaire et aciculaire (**figure I.5**).

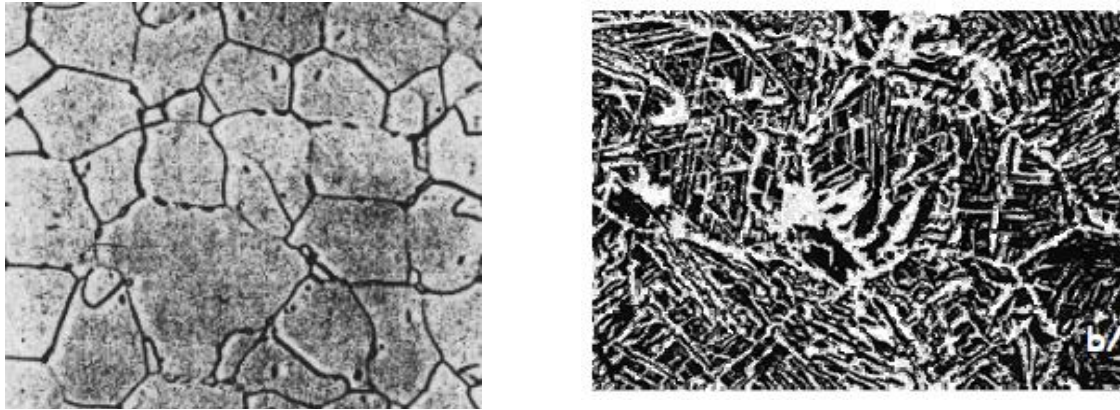


Figure I.5 : structure de ferrite : a/ granulaire, b/ aciculaire. [10]

I.7.2 Perlite

La perlite est le produit de la réaction eutectoïde dans l'acier. Lors du refroidissement sous la température A_1 d'un alliage Fe-C, l'austénite contenant 0,77% poids de carbone se transforme en un composé de ferrite et de cémentite nommé perlite. Ce composé est une alternance de lamelles de ferrite et de cémentite finement espacées comme le montre la **figure 1.6**.

Elle est très dure ($HB=200$), tenace ($R_m=850\text{N/mm}^2$) et assez ductile ($A\%=10$), facile à usiner et offre une assez bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements [9, 10].

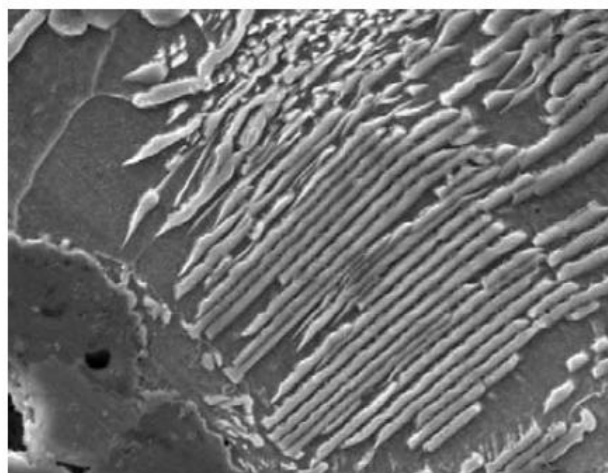


Figure I.6 : structure perlitique.

I.7.3 Austénite

L'austénite est une solution solide de carbone dans l'allotropie γ du fer, qui est stable entre 910°C et 1394°C. Cette allotropie a une structure cristallographique cubique à faces centrées, qui permet une grande solubilité du carbone (jusqu'à 2,1% massique à 1147°C). Elle est assez douce et assez facile à usiner. Elle possède un coefficient de dilatation élevé et une bonne résistance à l'usure (**figure I.7**). Elle possède une bonne résilience aux températures cryogéniques et sa dureté est entre 240 et 300 HB [9, 10].

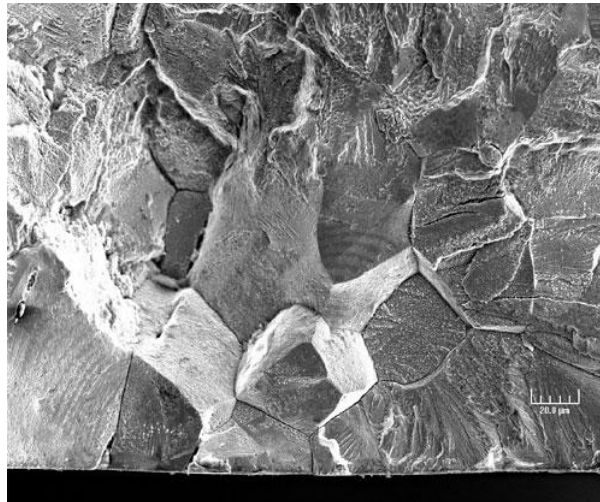


Figure I.7: structure austénitique

I.7.4 Martensite

C'est une solution solide d'insertion sursaturée de carbone dans le fer α . C'est le constituant de trempe le plus dur (HV=800), mais il est fragile. Elle est obtenue par refroidissement rapide de l'austénite et de ce fait pénètre plus ou moins au cœur de la matière. Elle est très dure, difficilement usinable et assez fragile. En effet, dans les aciers, comme dans un grand nombre d'alliage à base de fer, on peut rencontrer deux principaux types de morphologie de martensite, (**figure I.8**), [9-13].

Lorsque la structure de la martensite est observée, celle-ci peut apparaître sous différentes formes. On distingue la martensite en lattes ou la martensite en plaquettes (**figure I.8**), ces deux morphologies dépendant de la teneur en carbone de l'acier. La Figure I.5 présente les domaines d'existence des deux morphologies de la martensite. Ainsi, la martensite en lattes est observée pour un acier à faible teneur en carbone, ne dépassant pas les 0,6%. Pour une teneur en carbone supérieure à 1%, seule la martensite en plaquettes s'est présente. Enfin, pour des teneurs en carbone comprises entre 0,6% et 1%, les deux types de morphologie coexistent [9-13].

a) Martensite en latte

b) Martensite en plaquette

Figure I.8 : structure de martensite

I.7.5 Bainite

Lorsque le taux de refroidissement ou la température de transformation se situent entre la formation de la perlite et de la martensite, il y a formation d'un autre produit de réaction métastable nommé bainite. Tout comme la perlite, la bainite est constituée de ferrite et de cémentite. La microstructure résultante est toutefois très différente de celle de la perlite et varie en fonction de la température de formation. Elle est dure et assez facile à usiner.

I.8 Traitements thermiques des aciers

Un traitement thermique est une opération qui a pour but de modifier la structure interne d'un acier, sans influencer sur sa composition chimique, afin de donner à cet acier les caractéristiques mécaniques convenables pour son emploi.

Un traitement thermique comporte obligatoirement (**figure I.9**) :

1. Un chauffage ;
2. Un maintien pendant un temps à la température de traitement ;
3. Un refroidissement (retour à la température ambiante).

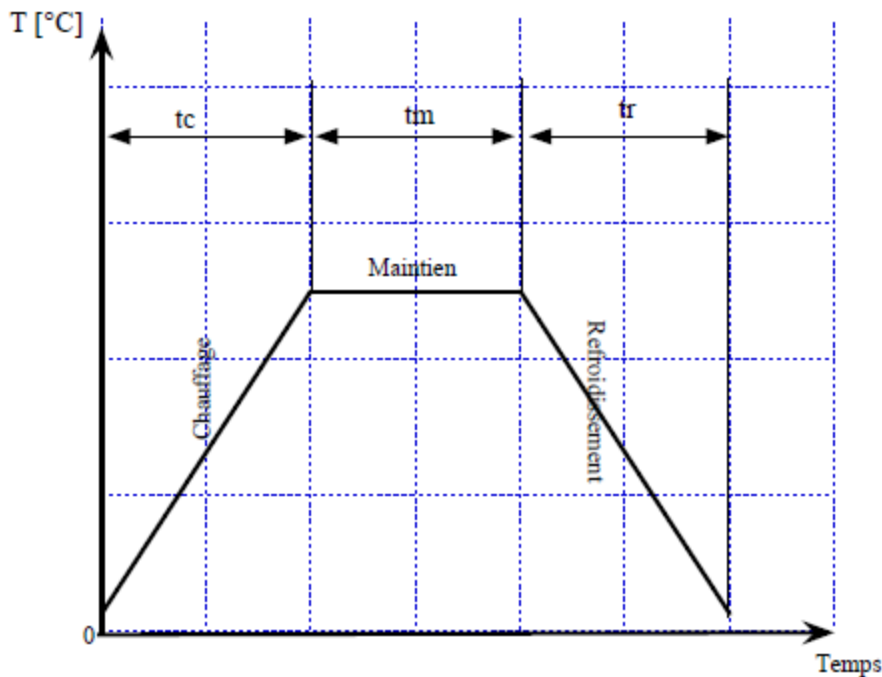


Figure I.9: cycle thermique d'un traitement

I.8.1 La trempe d'un acier faiblement allié

La trempe d'un acier faiblement allié est un processus thermique qui consiste à chauffer l'acier à une température élevée (entre 800°C et 900°C pour les aciers faiblement alliés), puis à le refroidir rapidement dans un de l'eau ou d'huile pour provoquer une transformation martensitique et d'augmenter la dureté de l'acier, qui peut être portée jusqu'à HRC=60 à 65, ce qui donne une structure parfaite pour le traitement de revenu de sa structure cristalline. Cette transformation est responsable des propriétés mécaniques et de la résistance de l'acier, qui est améliorée par la trempe [10-13]. .

▪ La trempe à l'eau

Ce traitement est spécifique aux aciers qui ont besoin de changer leurs caractéristiques mécaniques et d'obtenir des résultats exceptionnels.

Dans ce traitement, l'acier est refroidi dans un bain d'eau (eau chaude à 140°C/seconde, eau froide à 140°C/seconde) afin d'obtenir un taux de refroidissement très élevé. Ce genre de trempe présente un risque de décalage des atomes qui provoque des fissures.

▪ La trempe à huile

Ce traitement est principalement utilisé avec les aciers faiblement alliés comme 42CrMo4. Le but de ce traitement est de refroidir rapidement l'acier pour favoriser la formation de martensite, une structure cristalline dure et résistante.

Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite.

Pendant le processus de trempe, l'acier est immergé dans une casserole d'huile. Les vitesses de refroidissement dans l'huile sont généralement plus lentes que dans l'eau, ce qui permet un refroidissement plus contrôlé pour éviter des contraintes ou des déformations excessives. La vitesse de refroidissement de l'huile dépend de divers facteurs, notamment la température de l'huile, la composition de l'acier et l'épaisseur de la pièce. Les taux de refroidissement typiques pour la trempe à l'huile sont d'environ 70 %, mais cela peut varier en fonction des spécifications de traitement et des résultats souhaités [14].

La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe est indiquée sur le tableau I.1.

Tableau I. 1 : Vitesse de refroidissement

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C / seconde
Eau froide	160 °C / seconde
Eau tiède	150 °C / seconde
Eau chaude	140 °C / seconde
Huile de trempe	70 °C / seconde
Air soufflé	20 °C / seconde
Air calme	2 °C / seconde
Dans un moule de sable	0,05 °C / seconde
Dans le four	0,01 °C / seconde (ou selon la programmation du cycle)

1.8.1.1 Facteurs de trempe

Les transformations subies par l'acier lors du refroidissement dépendent de nombreux facteurs [14-16].

En première approximation, pour une pièce de petite dimension, les facteurs de trempe sont au nombre de quatre :

- 1- Composition chimique ;
- 2- Température de trempe ;

3- Loi de refroidissement ;

4- Effet de masse.

➤ Composition chimique

Ce facteur est lié au diagramme T.R.C ; (transformation de l'acier au cours d'un refroidissement continu). En général les éléments alliés accroissent la trempabilité, car en leur présence, le refroidissement est de moins en moins rapide pour l'obtention de la martensite.

A titre d'exemple, les diagrammes TTT et le TRC de l'acier 42CrMo4 sont présentés sur la figure I.0 et I.11, [10].

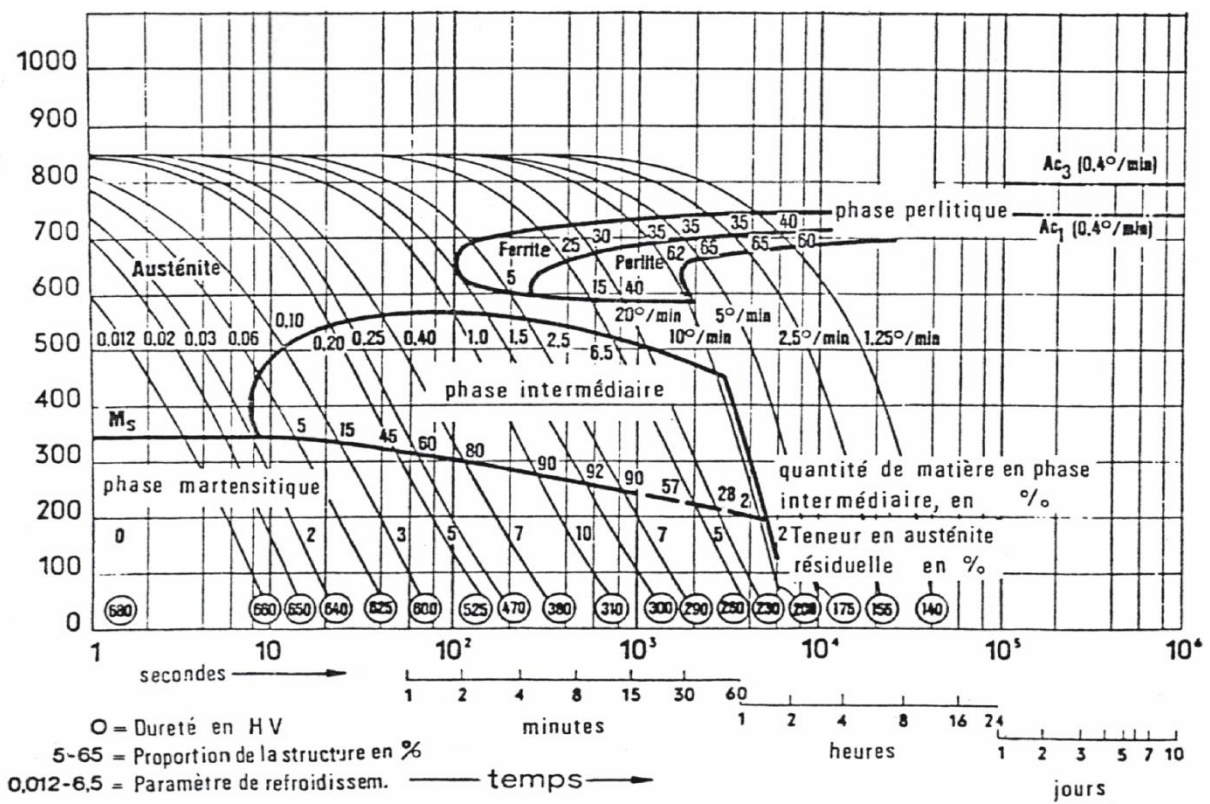


Figure I.10: diagramme T.R.C de l'acier 42CrMo4.

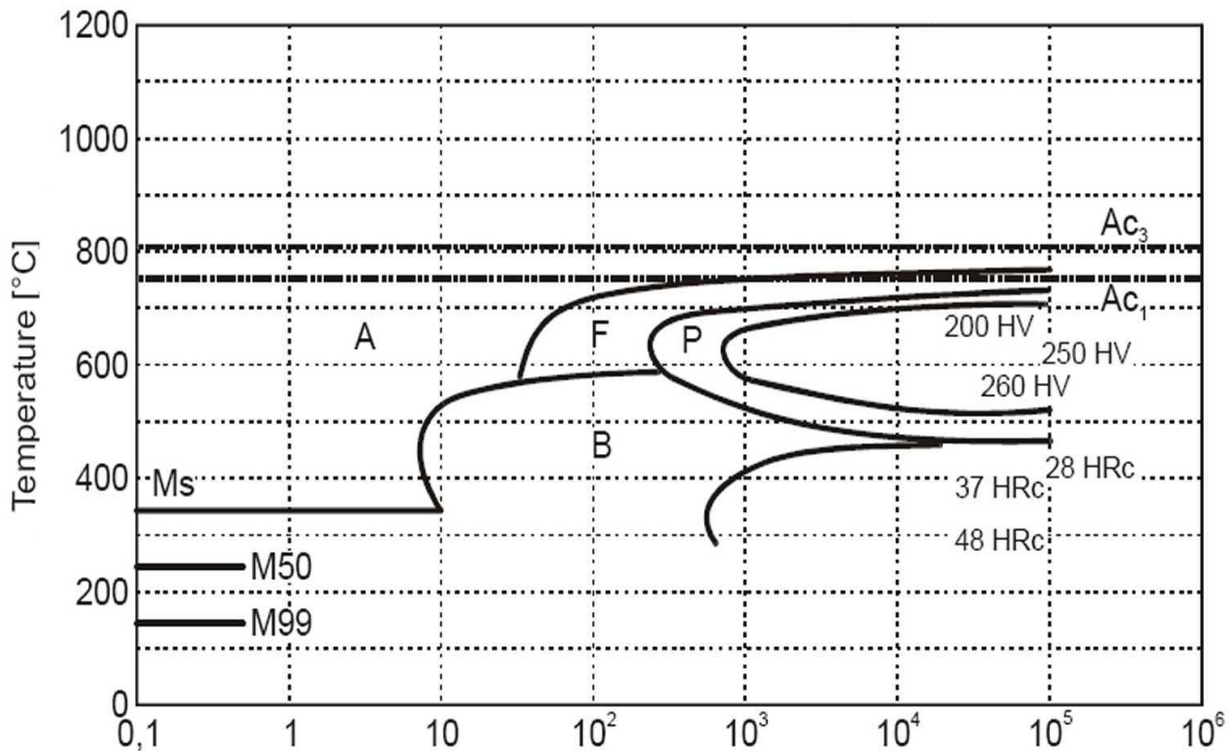


Figure I.11 : diagramme T.T.T de l'acier 42CrMo4

Sur le diagramme TRC, on observe, selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures pouvant être obtenues lors de la composition de l'austénite :

- Pour des vitesses de refroidissement très lentes, on obtient des structures ferrito-perlitiques.
- Des structures martensitiques se forment pour des vitesses de refroidissement très rapides.
- Pour des vitesses de refroidissement intermédiaires, des structures bainitiques sont susceptibles de se constituer.

➤ Température de trempe

Pour que la trempe produise de l'effet, il faut porter le métal à l'état de l'austénite. On doit donc avoir une température suffisamment élevée (régie par le diagramme fer-c) .pour les aciers hypo-eutectoïdes, on réalise le plus souvent une austénitisation complète, il est donc nécessaire de dépasser AC_3 .

En générale, la température de trempe égale à [16 - 18]:

$$\theta t = AC_3 + 30 \text{ à } 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

➤ Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement donne la variation de la température en fonction du temps en un point de la pièce traitée (Figure I.12).

En établissant des courbes de refroidissement pour de nombreuses températures, on obtient un diagramme de transformation isotherme de l'austénite ou, diagramme T.T.T ; (transformation en fonction du temps et de la température).

La loi de refroidissement est la relation qui lie la température T (θ) au temps (t) et généralement $\theta = f(\log t)$; l'échelle logarithmique permet un étalement convenable des courbes relatives aux refroidissements rapides.

a) Refroidissement lent

Si on pratique un refroidissement lent, l'austénite donne à température ambiante soit de la perlite + ferrite (0,2 à 0,85% de C), de la perlite seule (0,85% de C) ou de la perlite + cémentite (0,85 à 1,7% de C). Ce processus peut être totalement ou partiellement empêché selon la vitesse de refroidissement, il y a alors apparition de martensite ou de bainite .

b) Refroidissement rapide

Le refroidissement se faisant rapidement (au-delà de la vitesse critique de trempe), les atomes de carbone en solution dans le fer n'ont pas le temps de diffuser, ce qui permettrait l'apparition de ferrite et de cémentite. Ils restent donc prisonniers dans le fer α . Il y a apparition de martensite qui est une solution sursaturée de carbone dans le fer α . Cette sursaturation provoque une déformation du réseau cristallin par cisaillement du réseau d'austénite. Il s'ensuit l'apparition de fortes contraintes qui produisent l'augmentation de la dureté.

c) Refroidissement intermédiaire

Quand la vitesse de refroidissement est intermédiaire, une certaine quantité de carbone qui serait en sursaturation dans le fer a le temps de s'échapper. Il y a donc formation de ferrite et de cémentite.

Les constituants formés par le carbone dans le fer α sont généralement appelés bainite. On parle de bainite supérieure, moyenne ou inférieure selon le degré de dureté. La martensite est un constituant très dur, la bainite l'est un peu moins mais elle rend les matériaux moins fragiles.

Plus la température est basse avec une vitesse de refroidissement grande, plus il se forme de la martensite. Dans ces conditions, la quantité de martensite augmente sous l'effet de formation

des cristaux. Lorsqu'une température déterminée pour chaque acier est atteinte, l'austénite cesse de se transformer en martensite ; cette température est notée : (MF)

Lorsque le refroidissement est très rapide, la décomposition de l'austénite par diffusion devient impossible, et toute l'austénite subit alors la surfusion jusqu'au point MS et se transforme en martensite : (courbe VC) cette vitesse de refroidissement minimal qui correspond à la transformation de toute l'austénite en martensite s'appelle (vitesse critique de trempe). Elle est déterminée par la formule suivante :

$$V_c = \frac{A_1 - t \text{ min}}{1,5 \tau \text{ min}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{S}]$$

A1 : la température du point d'équilibre 721° C.

τ min : la durée de stabilité minimale de l'austénite dans le domaine perlitique.

t min : la température de stabilité minimale de l'austénite surfusionnée.

La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe est indiquée sur le tableau I.1.

Chapitre

II

II.1 Applications des Plans d'Expérience dans l'Industrie Métallurgique

De nombreuses études ont montré l'efficacité des plans d'expérience pour l'optimisation des traitements thermiques. Par exemple, des recherches ont démontré comment l'ajustement des paramètres de trempe et de revenu peut améliorer significativement la dureté et la résistance à l'usure des aciers.

Les plans d'expérience sont des outils statistiques utilisés pour étudier les effets de plusieurs variables simultanément. Ils permettent d'optimiser les processus en identifiant les interactions et les effets principaux des variables. Parmi les types couramment utilisés figurent les plans factoriels complets et fractionnaires.

II.2 Objectifs de l'analyse statistique

En général, une expérience est définie comme un test ou une série d'essais dans lesquels des modifications intentionnelles sont apportées aux variables d'entrée d'un processus ou d'un système afin d'observer et d'identifier les raisons des changements qui peuvent être observés dans la sortie [17]. Elle est utilisée pour étudier la performance des processus et des systèmes. Le processus ou le système peut être représenté par la figure II.1.

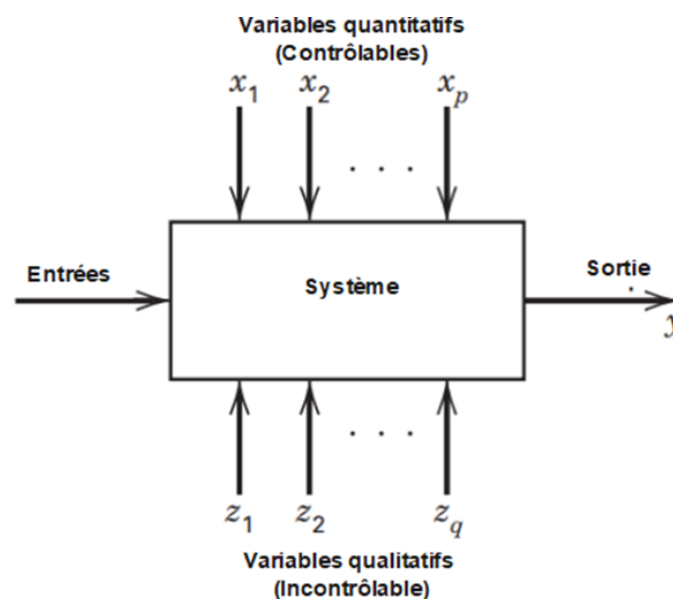


Figure II.1. Modèle général d'un processus ou d'un système

Les objectifs de l'expérience peuvent inclure les éléments suivants :

- Déterminer les variables qui influent le plus sur la réponse
- Déterminer où placer les x influents afin que y soit presque toujours près de la valeur nominale désirée

- Déterminer où placer les x influents afin que la variabilité de y soit faible
- Déterminer où placer les x influents afin que les effets des variables incontrôlables z_1, z_2, \dots, z_q sont réduits au minimum.

Donc, La méthode des plans d'expériences (MPE) est une technique statistique permettant d'évaluer plusieurs variables d'entrée ou de test, appelées facteurs à un nombre donné de niveaux dans un nombre prédéfini d'expériences pour l'optimisation d'une ou des variables de sortie, appelées réponses. Plus précisément, elle constitue essentiellement de planification d'expérience afin de comprendre les relations lient la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux [17, 18].

Dans cette étude, elle permet de déterminer l'influence des différents paramètres du procédé tels que les paramètres du traitement thermique sur la réponse mesurée (la dureté de l'acier).

L'approche repose sur la construction d'un modèle mathématique par régression linéaire, permettant de quantifier les effets individuels et combinés des facteurs. La significativité des coefficients du modèle est évaluée à l'aide du **test de Student**, tandis que la validité globale du modèle est vérifiée grâce au **test de Fisher**.

II.3 Les différents plans d'expériences

II.3.1 Le plan factoriel complet

Le plan factoriel complet est l'un des criblages couramment utilisés pour l'étude des paramètres significatifs et déterminer les effets des facteurs indépendants et leurs interactions, cela peut conduire à une matrice d'expérience factorielle [19].

- *Plan d'expérience de premier ordre 2^k*

Pour deux facteurs, le domaine d'études est un carré complet. Le modèle mathématique est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur [17-19]. Le modèle est :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1\mathbf{X}_1 + \mathbf{b}_2\mathbf{X}_2 + \mathbf{b}_{12}\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2 + \mathbf{E} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

\mathbf{Y} : réponse,

\mathbf{b}_0 : valeur de la réponse au centre du domaine d'étude,

\mathbf{b}_1 : effet du facteur 1,

\mathbf{b}_2 : effet du facteur 2,

\mathbf{b}_{12} : interaction entre les facteurs 1 et 2,

\mathbf{E} : résidu,

▪ *Plans d'expériences simplifiés de type 2^{k-p}*

Pour l'étude de quatre, cinq ou plusieurs paramètres, les plans d'expériences de type 2^k nécessitent un nombre important d'expériences, à cause des interactions de faibles influences. Il y'a possibilité de réduire le nombre d'expériences. Un plan de type 2^5 nécessite 82 expériences, il pourra être alors remplacé par un plan simplifié de type 2^{5-2} par exemple, pour devenir un plan de type 2^3 , nécessitant huit expériences seulement ; avec une précision peu réduite [19].

▪ *Plans d'expériences de deuxième ordre 3^k*

Nous avons considéré jusqu'ici des facteurs prenant deux niveaux seulement. Nous allons étudier dans ce paragraphe les facteurs prenant plus de deux niveaux. Le modèle mathématique adopté dans les paragraphes précédents était du premier degré par rapport à chacune des variables. Si ce modèle du premier degré est validé, il est rarement nécessaire de poursuivre l'expérimentation. Par contre, s'il n'est pas validé il faut passer à un modèle de degré plus élevé.

Le modèle mathématique est analogue à la relation I.2, à laquelle on ajoute un terme carré.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Y} = \mathbf{b}_0 + \sum \mathbf{b}_i \mathbf{X}_i + \sum \mathbf{b}_{ij} \mathbf{X}_i \mathbf{X}_j + \sum \mathbf{b}_{ijk} \mathbf{X}_i \mathbf{X}_j \mathbf{X}_k + \dots \\ + \sum \mathbf{b}_{ik} \mathbf{X}_i \dots \mathbf{X}_k + \sum \mathbf{b}_{ii} \mathbf{X}_i^2 \end{array} \right\} \quad (\text{II.2})$$

Il y a six inconnues à déterminer. Le plan d'expériences fournit un certain nombre de la réponse \mathbf{Y} . L'interprétation du plan consiste donc à trouver les coefficients, et par suite à résoudre un système de « n » équations.

▪ *Plan composé $2^k.3^n$*

On utilise, un plan de ce type lorsque certains facteurs influents ont deux niveaux et les autres ont trois niveaux, et également pour la présentation des effets quadratiques de quelques paramètres seulement et non pas les autres.

II.3.1.1 Avantages des plans factoriels complets

Les avantages des plans factoriels complets sont nombreux et nous n'en citerons que les principaux:

- Les plans factoriels sont faciles à construire;
- Comme chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreurs sont minimisés;
- Le calcul des effets et des interactions est très simple et ne demande pas d'outils informatiques évolués;

- L'interprétation des résultats est à la portée de tout expérimentateur et ne demande pas de connaissances approfondies en statistiques;
- La modélisation mathématique est immédiate;
- Les résultats obtenus avec un premier plan peuvent être utilisés en partie ou en totalité soit, pour explorer une autre zone du domaine expérimental soit, pour établir un modèle mathématique de degré plus élevé.

Le seul inconvénient de ces plans est qu'ils obligent rapidement à faire beaucoup d'essais. Par exemple, pour étudier simplement six facteurs il faut réaliser 64 expériences telles qu'au moment de l'interprétation, que beaucoup d'essais ont été réalisés pour rien. En effet, de nombreuses interactions sont nulles et certains facteurs sont sans influence. C'est pour palier cet inconvénient que les plans factoriels fractionnaires ont été développés.

II.3.2 Le plan factoriel fractionnaire

Lorsque le nombre d'analyses pour un plan factoriel complet est relativement grand, les informations souhaitées peuvent souvent être obtenues en effectuant seulement une fraction du plan factoriel complet, qui est souvent appelé la conception factorielle fractionnaire. Elle est plus efficace qu'un plan factoriel complet car moins d'essais expérimentaux nécessaires pour un nombre égal de facteurs [17, 20]. Le nombre d'expériences dans ce plan est calculé à partir de S^{k-p} , où S est les niveaux de facteur, k est le nombre de facteurs, et p décrit la taille de la fraction de la factorielle complète utilisée et calculé par la formule suivante [24] :

$$p \leq \left(k - \frac{\ln(1+k)}{\ln 2} \right) \quad , p \in N^* \quad \text{II.3}$$

Le principal inconvénient de cette conception est que les effets d'interaction inadéquats et imprudents car il n'y a pas d'erreur expérimentale.

II.4 Notion de la modélisation mathématique

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne à priori, une loi d'évolution dont la formulation la plus générale est la suivante :

$$Y = \varphi (X_1, X_2, X_3, \dots, X_L) \quad \text{II.4}$$

Cette fonction est trop générale et il est d'usage d'en prendre un développement limité de Taylor. Si les dérivées du développement de Taylor peuvent être considérées comme

constantes [21 - 23], le développement précédent prend la forme d'un polynôme de degré plus au moins élevé.

$$Y = b_0 + b_i X_i + b_j X_j + b_{ij} X_{ij} + E \quad \text{II.5}$$

- Y : est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur, c'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- X_i : représente le niveau attribué au facteur i. C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai, cette valeur est parfaitement connue.
- X_j : représente le niveau attribué au facteur j.
- b_0, b_i, b_j, b_{ij} : sont les coefficients du modèle mathématique adopté à priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats expérimentaux.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir utiliser tous les résultats de l'algèbre matricielle. Il est possible d'utiliser d'autres fonctions mathématiques. Toutefois, l'usage montre que les polynômes permettent de résoudre la plupart des problèmes et ceux qui ont la faveur des expérimentateurs.

II.4.1 Codages des facteurs

D'habitude, tous les paramètres d'entrées ont différentes unités de mesure, pour faciliter le traitement des données. On codifie les valeurs des paramètres, les coordonnées deviennent sans dimension. Le codage se fait comme suit :

La valeur moyenne X_{i0} est appelée « niveau de base » des $i^{\text{ème}}$ facteurs. La valeur absolue de la moitié de l'intervalle de mesure est appelée « intervalle de variation » des $i^{\text{ème}}$ facteurs ΔX_i . La détermination des ces deux valeurs est comme suit [23, 24] :

$$X_{i0} = \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2} \quad \text{II.6}$$

$$\Delta X_i = \frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2} \quad \text{II.7}$$

II.4.2 Notion d'espace expérimental et terminologie

Ce paragraphe rappelle les principaux termes utilisés dans la méthode des plans d'expériences qui sont :

- Le facteur,
- La réponse,
- La surface de réponse.

II.4.2.1 Le facteur

Lors de l'étude, les variables à étudier sont appelées facteurs. Ces derniers varient généralement entre deux bornes [24]:

- La borne inférieure (-1),
- La borne supérieure (+1).

Lors de l'application des plans d'expérience, le facteur varie entre le niveau bas et le niveau haut qui sont représentés respectivement par -1 et +1. L'ensemble de toutes valeurs prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut est dénommé le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

La figure II.2 représente le domaine de variation d'un seul facteur :

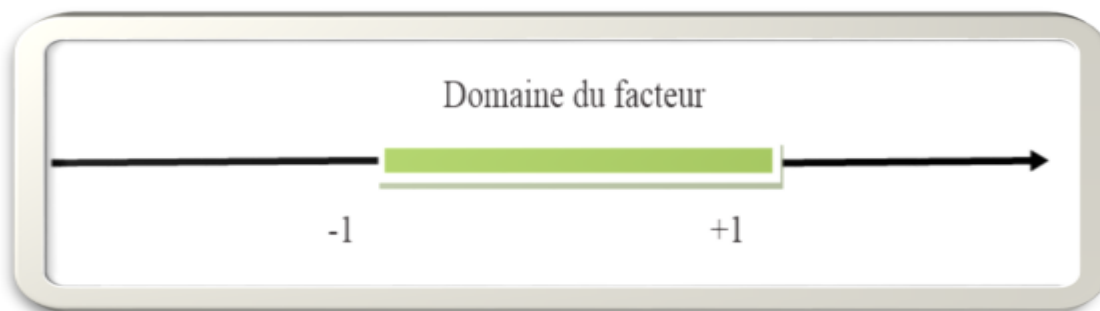


Figure II.2 : Domaine de variation d'un seul facteur.

Avec :

-1 : niveau bas

+1 : niveau haut

Les niveaux des facteurs peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental.

Une expérience donnée est alors représentée dans ce système d'axes par un point : Ce point est appelé point expérimental ou point d'expérience.

Un plan d'expériences représente un ensemble de plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont illustrés dans la figure II.3.

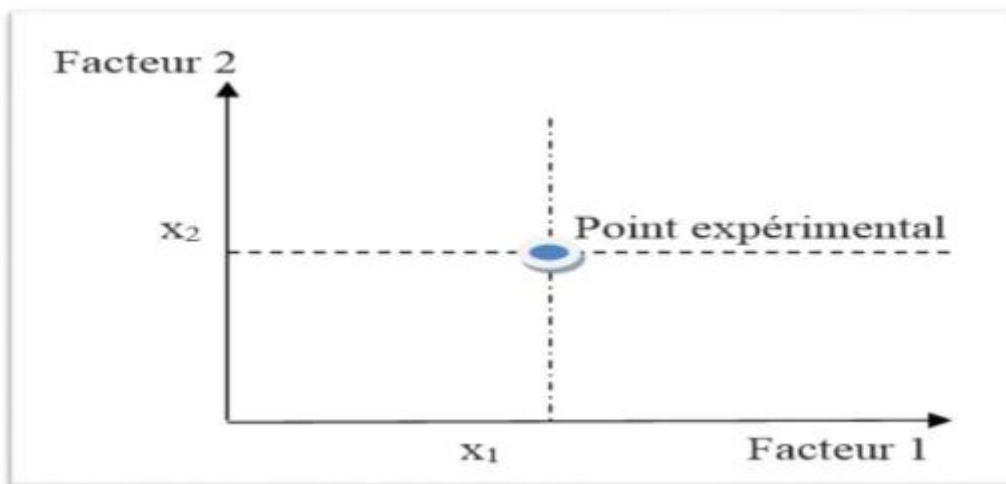


Figure II.3 : Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

II.4.2.2 La réponse

Les grandeurs intéressant l'expérimentateur est mesurées à chaque expérience sont appelées réponses.

II.4.2.3 Surface de réponse

En l'absence de toute indication sur la fonction liant la réponse aux facteurs, on se guide à priori par une loi d'évolution.

Cela définit le modèle mathématique.

Quand on recherche le lien existant entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , on se référera aux plans d'expériences si l'on étudie une fonction de type ;

$$Y = f(x_i) \quad \text{II.8}$$

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental. 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 définissent une surface appelée la surface de réponse.

La figure II.4 représente une surface de réponse :

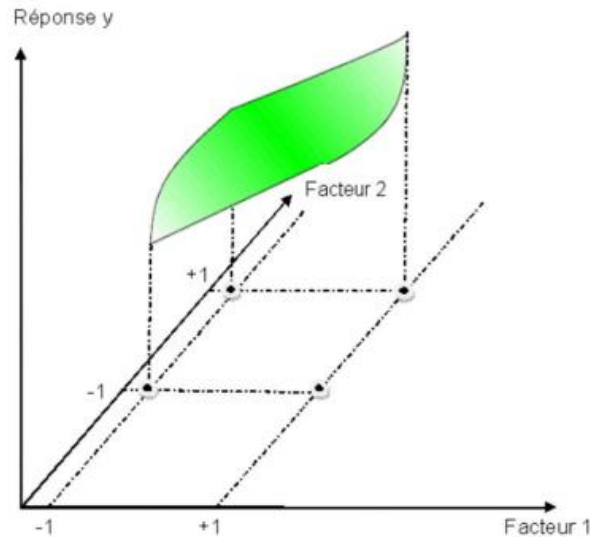
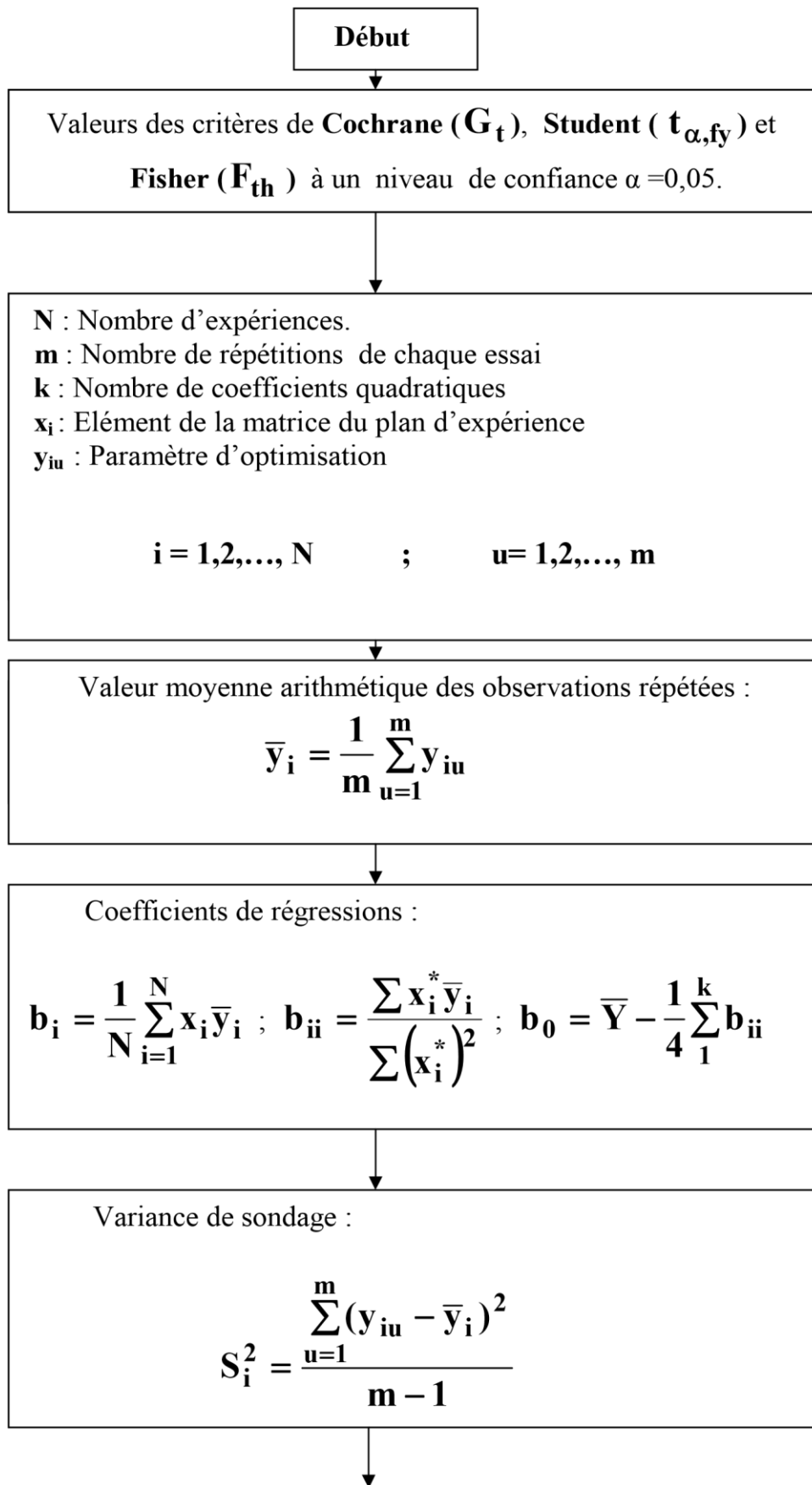


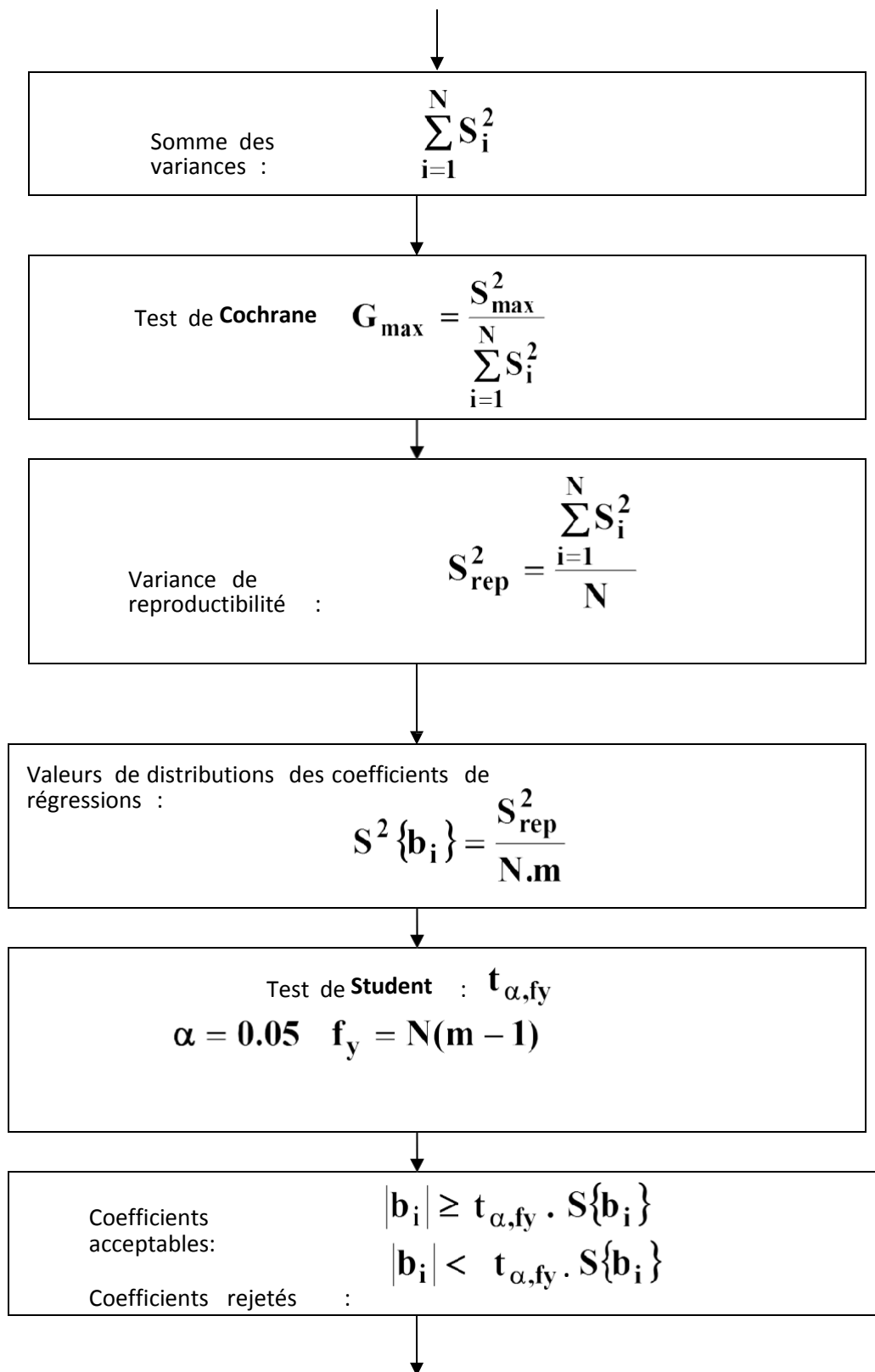
Figure II.4 : Représentation d'une surface de réponse.

II.5 Analyse de régression

C'est une analyse statistique des résultats, qui consiste à tester la signification de tous les coefficients de régression par comparaison à l'erreur de reproductibilité et à vérifier l'adéquation du modèle mathématique obtenu, voir algorithme, figure II.5. On peut diviser cette analyse en deux parties [17- 24] :

1. Tester la signification des coefficients de régression par le test de Student.
2. Vérifier si l'équation de régression est adéquate avec le test de Fisher





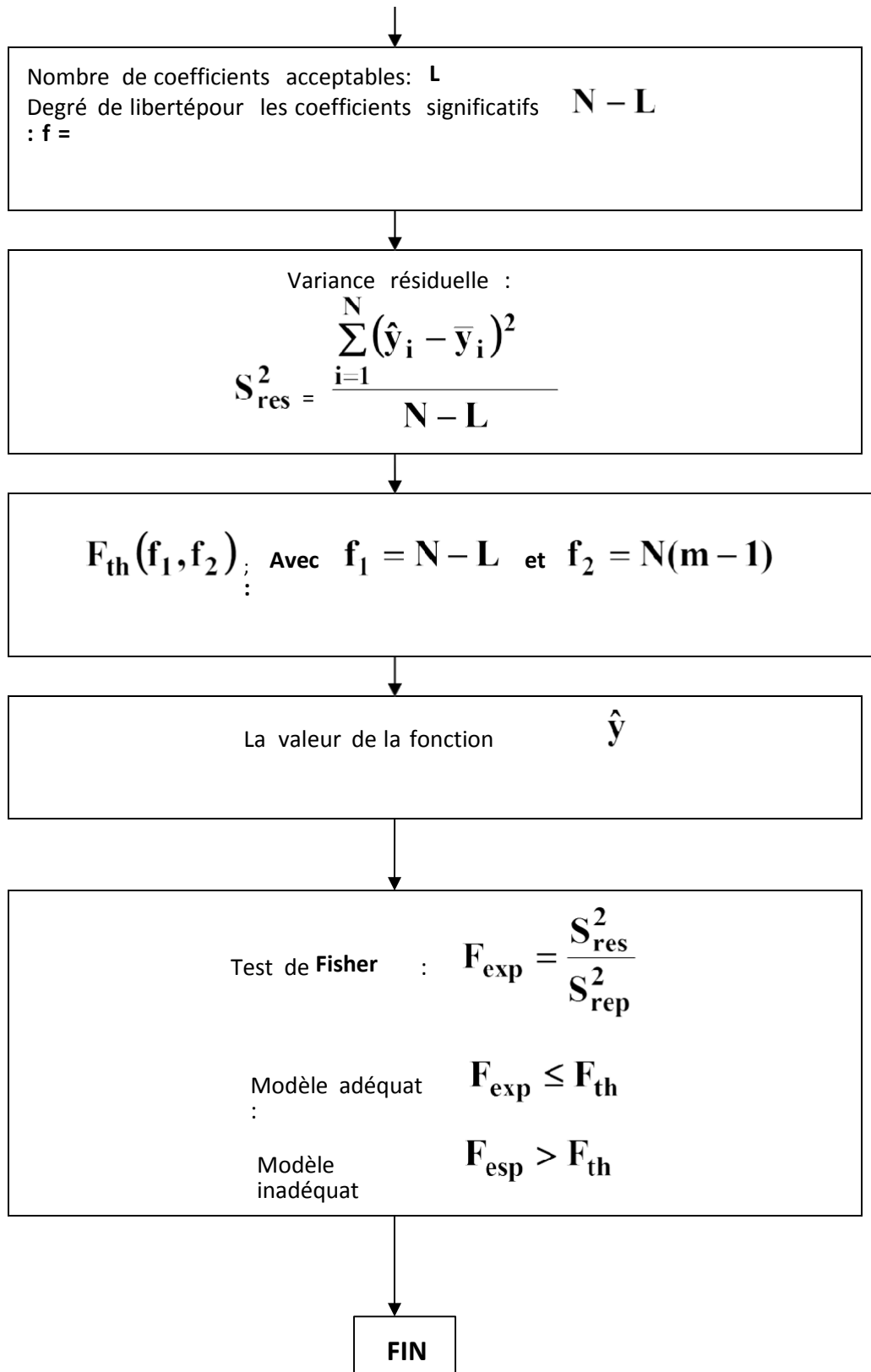


Figure II.5: algorithme de calcul.

Chapitre

III

III.1 Essai de dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure. Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension. Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell. Ces méthodes permettent de déterminer la dureté d'un matériau à partir de la résistance d'un solide à une déformation locale.

Les indenteurs doivent être plus durs que le matériau sur lequel la dureté est mesurée et leurs géométries sont généralement sphériques, coniques à pointe hémisphérique, pyramidales à base carrée, triangulaires ou rhomboédriques.

Un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé. Selon la forme et la nature du pénétrateur.

III.1.1 Essai Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'angle au sommet entre faces opposées égal à 136° . L'empreinte est une pyramide en creux de diagonale moyenne d (en mm, moyenne des deux diagonales du carré de base, mesurées à l'aide d'un appareil optique approprié). La charge d'essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée. La dureté est donnée par le rapport de F (en kg-force à l'origine) à la surface latérale de l'empreinte pyramidale, exprimée sans dimension.

La méthode Vickers peut être utilisée pour contrôler tous les métaux, des plus durs aux plus tendres, et grâce aux très faibles charges possibles, c'est la seule méthode qui permet de contrôler des échantillons très minces ou de très petites tailles.

Les duretés Brinell et Vickers donnent des résultats du même ordre, variant de quelques unités pour des matériaux très mous (plomb, matières plastiques...) jusqu'à quelques milliers pour les matériaux très durs (céramiques, carbures métalliques...).

Dans l'essai Vickers, une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur (figure III.1).

La dureté Vickers HV est définie par :

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

$$HV = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{la surface de l'empreinte}}$$

$$HV = \frac{2F \sin 68}{gd^2} = 1.8544 \frac{p}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

Avec :

F (N) : La charge appliquée au pénétrateur.

d (mm) : Le diagonale moyen de l'empreinte.

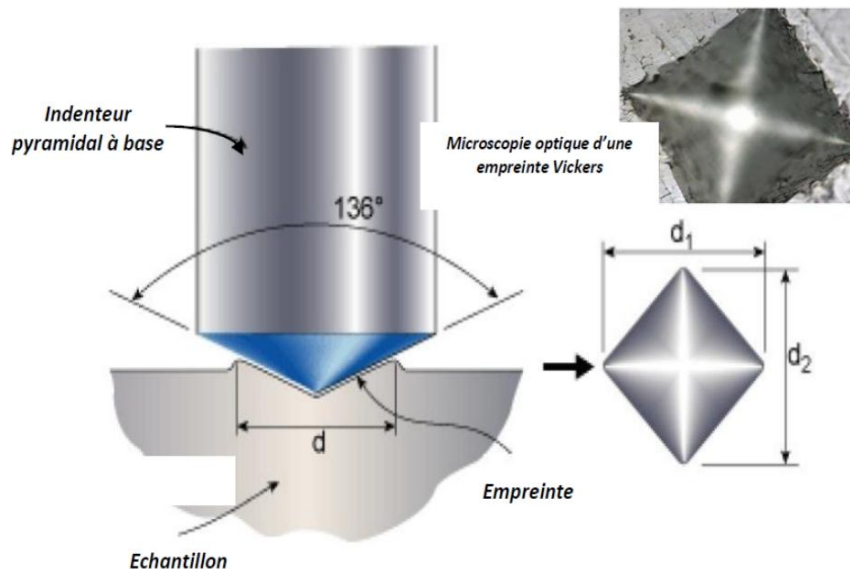


Figure III.1: Principe de dureté Vickers

Lors de notre travail en laboratoire à Mostaganem en 2023, nous avons utilisé l'essai de microdureté Vickers (figure II.1) pour évaluer les propriétés mécaniques d'un acier allié 42CrMo4, ce qui nous a permis d'obtenir des résultats précis sur sa résistance à la pénétration en fonction des traitements thermiques.

Les essais de microduretés ont été réalisés sur une machine Digital Microhardness Tester MHV-2000Z présentée dans la figure III.2. Un pénétrateur de forme pyramidal en diamant avec une base carrée d'angle au sommet 136°, est appliqué progressivement sous l'action d'une charge P de 0.1 Kgf (HV 0.1) sur une surface d'acier 42CrMo4 maintenu pendant un temps de 10 secondes. Le résultat de la dureté s'affiche automatiquement sur l'écran digital.



Figure III.2 : Essais mécaniques microdureté vickers au niveau de Laboratoire Elaboration et Caractérisation Physico Mécanique et Métallurgique des Matériaux, (ECP3M).

III.2 Matériau étudié

Le matériau étudié dans ce travail est un acier faiblement allié, couramment utilisé dans la fabrication de pièces mécaniques telles que les écrous et les tiges filetées. Ce type d'acier est largement employé par l'industrie mécanique en Algérie. Il contient principalement des éléments d'alliage tels que le chrome et le molybdène, dont la teneur cumulée ne dépasse pas 5 % [1]. Conformément à la norme AFNOR, cet acier est désigné sous l'appellation 42CrMo4 (voir tableau III.1).

Le tableau III.1 détaille la composition élémentaire ainsi que le tableau III.2 expose les caractéristiques et les propriétés de cet acier.

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier 42CrMo4.

<i>Eléments %</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Mini	0.38	0.15	0.50	0.90	0.15	≤ 0.035	≤ 0.035
Max	0.45	0.40	0.80	1.20	0.30	-	-

Tableau III.2: caractéristiques mécaniques conventionnelles.

Module de Young E (MPa)	Module de glissement M (MPa)	Limite d'élasticité R_e (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A%	Dureté HB
210000	81000	570 à 900	800 à 1300	13 à 10	250 à 445

III.3 Traitements thermiques étudié

Pour modifier les caractéristiques mécaniques des aciers ou alliages soumis aux différentes contraintes, l'industrie métallurgique effectue des traitements thermiques sur les matériaux après fabrication.

Ce traitement se fait sur le produit fini pour lui confiner les caractéristiques mécaniques demandées. Il s'agit généralement d'une trempe à l'eau ou à l'huile suivie d'un revenu.

Un traitement thermique de trempe a été effectué (tableau III.3), afin d'obtenir une structure martensitique. Le régime de ce traitement thermique, est le suivant :

Tableau III.3: Fiche d'essai de traitement thermique et de la dureté

N°	T°(C)	t(min)	Refroidissement	Dureté		
				HV 1	HV 2	HV 3
Essai 1	850	15	Huile	556	582	533
Essai 2	850	15	Eau	374.4	364	371
Essai 3	850	45	Huile	508	467.2	545.3
Essai 4	850	45	Eau	311.7	334.4	317.9
Essai 5	950	15	Huile	338.6	546.5	417
Essai 6	950	15	Eau	786.3	671.2	753
Essai 7	950	45	Huile	260.1	245.7	251.1
Essai 8	950	45	Eau	382.5	397.4	395.9

III.4 Analyse statistique

Il convient, d'effectuer une estimation de la variance et de contrôler la validité de la régression, en se basant sur les tests statistiques et en se référant aux critères de Cochran et de Student [17, 19, 22, 23].

L'analyse de l'équation de régression se fait à l'aide de la méthode suivante :

Plan $2^3 = 8$

N°	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ · X ₂	X ₁ · X ₃	X ₂ · X ₃	X ₁ · X ₂ · X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	556.0	582.0	533.0
2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	374.4	364.0	371.0
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	508.0	467.2	545.3
4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	311.7	334.4	317.9
5	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	338.6	546.5	417.0
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	786.3	671.2	753.0
7	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	260.1	245.7	251.1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	382.5	397.4	395.9

Valeur moyenne arithmétique \bar{Y}

557,000
369,800
506,833
321,333
434,033
736,833
252,300
391,933

Les coefficients b

B ₀	446.258
B ₁	7.167
B ₂	-78.158
B ₃	8.717
B ₁₂	-53.500
B ₁₃	101.892
B ₂₃	-20.183
B ₁₂₃	-20.608

Variance de sondage

$S_i^2 =$	601.000
	28.119
	1552.923
	137.663
	11023.203
	3508.023
	52.920
	67.303

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (Y_{iu} - \bar{Y}_i)^2}{m-1}$$

III.1

Somme des variances

$$\sum_{i=1}^{N=8} S_i^2 = 16944.1566$$

III.2

Test de Cochran

$$G_{max} = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^{N=8} S_i^2} = 0.6506$$

III.3

Variance de reproductibilité

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N=8} S_i^2}{N} = 2118.01958333$$

III.4

Valeurs de distributions des coefficients de régressions

$$S^2\{b_i\} = \frac{S_{rep}^2}{N \cdot m} = 88.2508 \Rightarrow S\{b_i\} = 9.394$$

III.5

Test de Student $f_2 = f_y = N \cdot (m - 1) = 8 \cdot 2 = 16 \quad \alpha = 0.05$

D'après le tableau 1 de (Student)

$$t_{\alpha, f_1} = 1.746$$

Coefficients acceptables

$$|b_i| \geq t_{\alpha, f_1} \cdot S\{b_i\} = 1.746 \cdot 9.394 = 16.402$$

III.6

Les coefficients de regression retenue doit etre superieur ou egale au valeur 16.402

Coefficients b_f après filtrage

B ₀	446.258	Accepter
B ₁	7.167	Non accepter
B ₂	-78.158	Accepter
B ₃	8.717	Non accepter
B ₁₂	-53.500	Accepter
B ₁₃	101.892	Accepter
B ₂₃	-20.183	Accepter
B ₁₂₃	-20.608	Accepter

On retient le modèle ayant uniquement les coefficients de régression significatifs, donné par la relation III.7

$$Y = 446.258 - 78.158 X_2 - 53.500 X_1 X_2 + 101.892 X_1 X_3 - 20.183 X_2 X_3 - 20.608 X_1 X_2 X_3 \quad \text{III.7}$$

Nombre de coefficients acceptables : L

$$L=6$$

Degré de liberté pour les coefficients significatifs :

$$f_1 = N - L \quad f_1 = 8 - 6 = 2 \quad f_2 = 2$$

Variance résiduelle :

Les valeurs de \hat{Y}

573.233
368.600
523.067
320.133
435.233
720.600
253.500
375.700

$$S_{res}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N-L} = 529.922 \quad \text{III.8}$$

Test de Fisher

Le test de Fisher [24, 25], est déterminé pour un niveau de probabilité donné dans le but de vérifier l'adéquation du modèle exprimant la réponse (Y) en fonction des paramètres considérés (X_1, X_2, X_3).

$$F_{exp} = \frac{S_{res}^2}{S_{rep}^2} = 0.2502 \quad \text{III.9}$$

D'après le tableau 2 de (Fischer) $f_1=2$ et $f_2=16$

$$F_{th} = 3.63$$

Modèle adéquat

$$F_{exp} \leq F_{th}$$

$$0.2502 < 3.63$$

Puisque $F_{exp} < F_{th}$, le test de Fischer est vérifié. Le modèle III.7 proposé décrit alors le phénomène d'une manière satisfaisante.

Donc le modèle codé III.7 acceptable :

$$Y = 446.258 - 78.158 X_2 - 53.500 X_1 X_2 + 101.892 X_1 X_3 - 20.183 X_2 X_3 - 20.608 X_1 X_2 X_3$$

III.3.1 Représentation graphique et discussion

Le polynôme de régression maintient à chaque fois un des paramètres par sa valeur constante pour mettre en évidence l'influence des autres paramètres sur la dureté de l'acier faiblement allié 42CrMo4. Par cette méthode, nous avons tracé les graphes décrivant la variation de Y en fonction des trois Paramètre (X_1 , X_2 , X_3).

- Pour une valeur minimale de la température d'austénisation $X_1 = -1$ (figure III.3), le modèle mathématique III.7 prend la forme suivante :

$$Y (X_i, b_i) = 446.258 - 24.658 X_2 - 101.891 X_3 + 0.425 X_2 X_3 \quad \text{III.10}$$

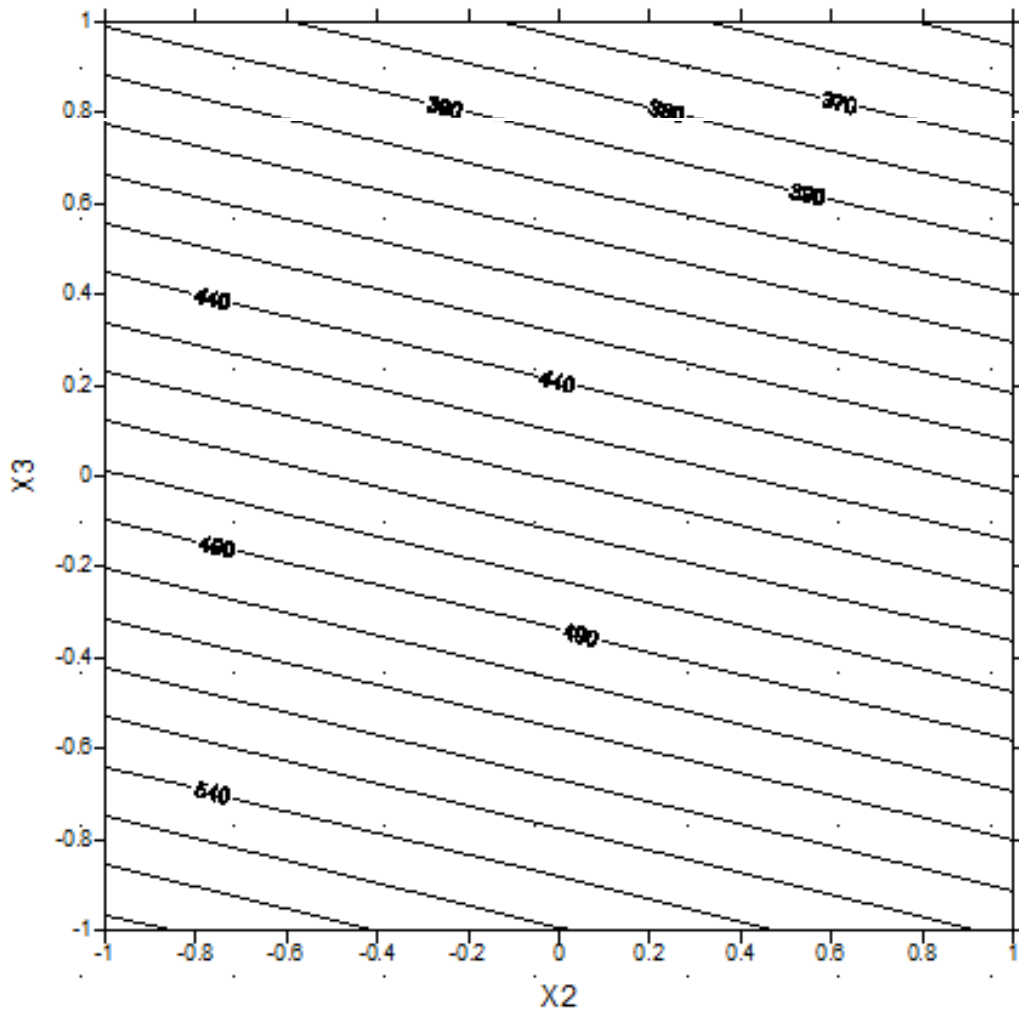


Figure III.3 : influence de la vitesse de refroidissement et le temps de maintien sur la dureté.

Analyse physique :

- Les lignes noires représentent des niveaux constants de dureté.
- Chaque ligne est associée à une valeur (ex. : 360, 400, 440, 480, etc.). Cela signifie que tous les points situés sur une même ligne ont la même dureté.

Les lignes sont presque parallèles et orientées en diagonale, ce qui suggère que les deux facteurs ont un effet linéaire sur la dureté.

En allant du coin supérieur droit (X_2 élevé, X_3 élevé) vers le coin inférieur gauche (X_2 faible, X_3 faible), on observe une augmentation de la dureté (valeurs croissantes : 360 → 640).

L'effet des deux facteurs est additif et sans interaction apparente (les lignes sont linéaires et parallèles).

Analyse métallurgique

Un refroidissement lent permet une transformation plus complète des phases (par exemple, transformation de l'austénite en martensite). Cela permet d'atteindre une microstructure plus fine et homogène, souvent plus dure.

Le refroidissement rapide crée souvent des contraintes thermiques qui favorisent la fissuration ou une structure plus grossière [14 - 16]. .

- Un temps de maintien plus court conserve une structure à grains fins, ce qui augmente la dureté par contre un long maintien à haute température favorise la croissance des grains, ce qui réduit la dureté (les gros grains sont moins résistants mécaniquement) [8 - 10]. .

➤ Pour une valeur maximale de le temps de maintien $X_2 = +1$ (45 min) le modèle mathématique **III.12** prend la forme suivante :

$$Y (X_i, b_i) = 368.258 - 53.5X_1 + 81.283 X_1X_3 - 20.183 X_3 \qquad \text{III.12}$$

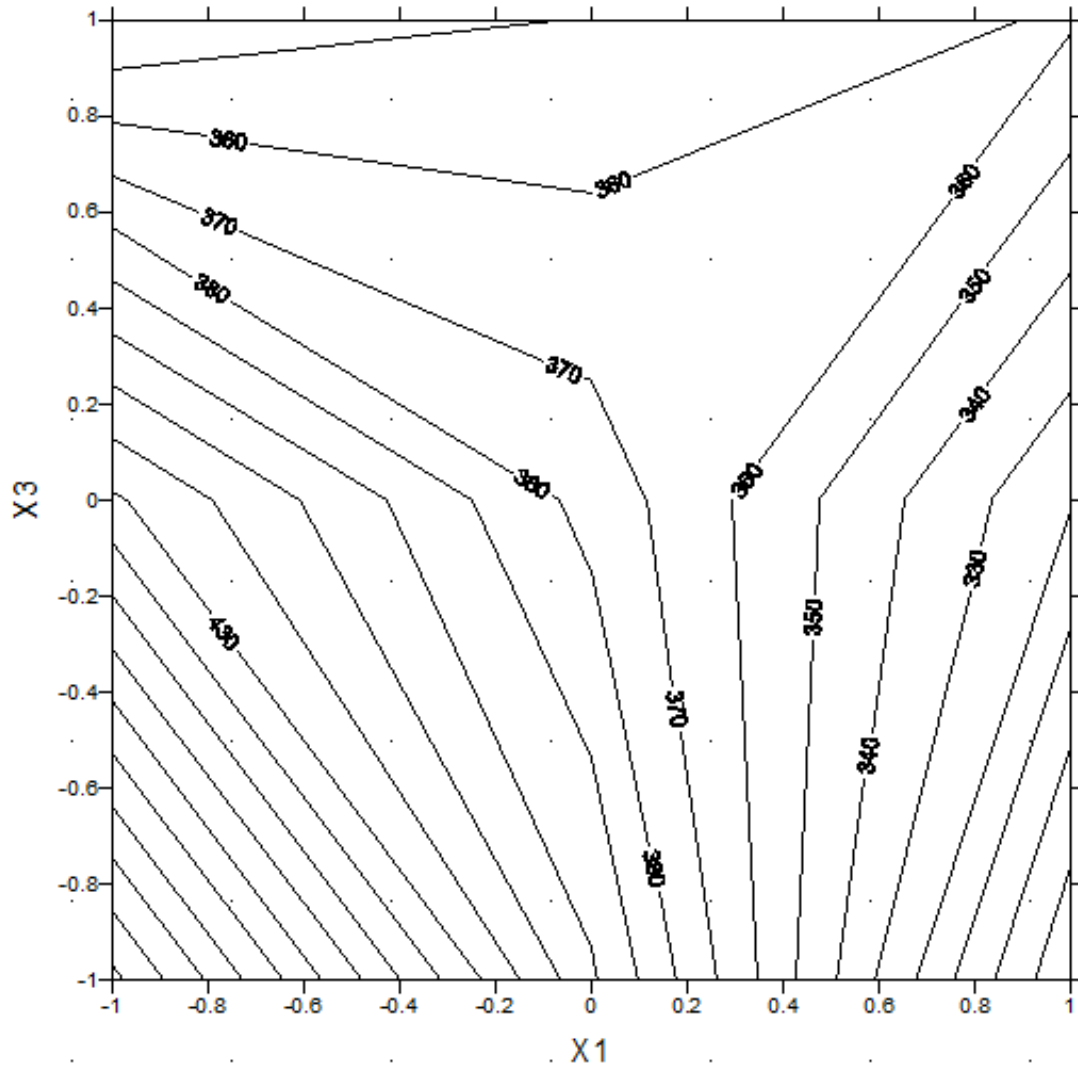


Figure III.4 : influence de la température d'austénisation et la vitesse de refroidissement sur la dureté.

La figure III.4 montre l'évolution de la dureté de l'acier 42CrMo4 en fonction de la température d'austénisation (X_1) et la vitesse refroidissement X_3 .

Les courbes représentent des lignes de niveaux de dureté : chaque ligne relie des points où la dureté est identique.

Sur l'axe X_1 (Température d'austénitisation) :

- À gauche ($X_1 = -1$) : on observe des valeurs de dureté relativement élevées, autour de 450.
- Au centre ($X_1 = 0$) : la dureté diminue vers ~370–400.
- À droite ($X_1 = +1$) : la dureté diminue encore plus fortement, atteignant des minimums de 300–340.

- A basse température d'austénitisation ($X_1 = -1$) :
 - Transformation partielle en austénite, mais grains plus fins, et peut-être conservation de carbures fins => dureté élevée.
- À température élevée ($X_1 = +1$) :
 - Surchauffe, grossissement des grains, dissolution excessive => perte de dureté.

➤ Pour une valeur minimale de la vitesse de refroidissement $X_3 = -1$ (refroidissement à l'huile) (figure III.5), le modèle mathématique III.7 prend la forme suivante :

$$Y(X_i, b_i) = 446.258 - 57.975X_2 - 32.892 X_1X_2 - 101.891X_1 \quad \text{III.10}$$

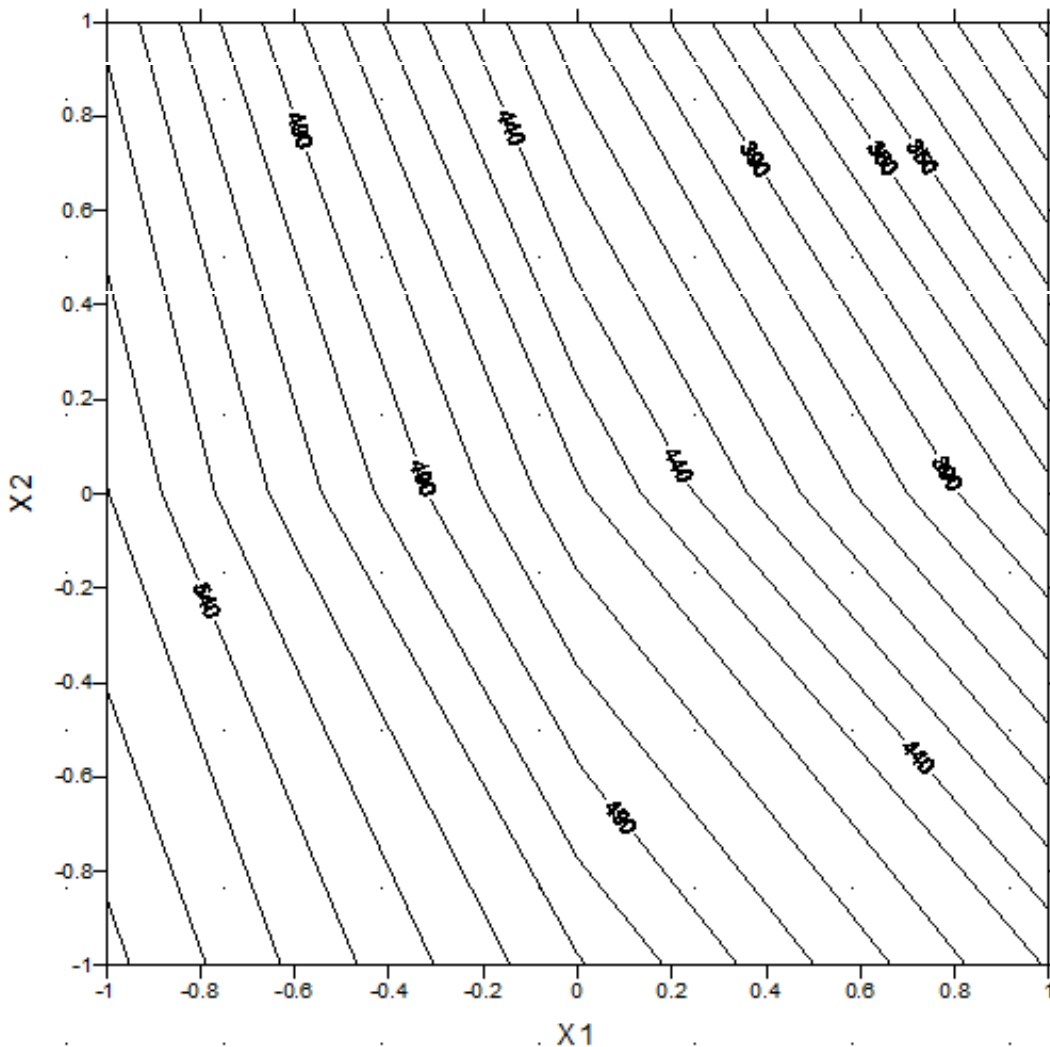


Figure III.5 : influence de la température d'austénitisation et le temps de maintien sur la dureté.

Analyse physique :

- La dureté diminue clairement quand :
 - X_1 augmente (vers la droite)
 - X_2 augmente (vers le haut)
- Les valeurs les plus élevées de dureté (**490 MPa**) sont observées en bas à gauche ($X_1 = -1$, $X_2 = -1$).
- Les valeurs les plus basses (430–440) sont dans le coin opposé ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$).
- Les lignes de niveau sont quasiment parallèles, ce qui indique que l'interaction entre X_1 et X_2 est faible, et que leurs effets sont additifs et linéaires dans cette plage.

Effet de la température d'austénitisation (X_1) :

- Lorsque X_1 augmente :
 - La dureté diminue.
 - Cela s'explique probablement par : Surchauffe → grossissement des grains → dureté moindre.
 - Éventuellement une dissolution excessive de carbures, rendant la phase austénitique trop homogène, et réduisant la dureté après trempe.

Effet du temps de maintien (X_2) :

- Lorsque X_2 augmente :
 - La dureté diminue, tel que un temps trop long favorise la croissance des grains, risque de phénomènes de sur-diffusion, appauvrissement local en éléments durcissants (comme le carbone) et moins de noyaux de transformation martensitique, donc dureté plus faible.

Conclusions générales et recommandation

La méthode de plans d'expériences a permis d'étudier l'influence de la température d'austénisation (X_1) dans l'intervalle (850° C à 950°), le temps de maintien (X_2) dans l'intervalle (15 à 45 min) et la vitesse de refroidissement (X_3) sur la dureté de l'acier 42CrMo4. Cette méthode permet d'évaluer et de déterminer un modèle exprimant la microdureté HV en fonction des paramètres du cycle thermique étudiés sous la forme suivante :

$$Y = 446.258 - 78.158 X_2 - 53.500 X_1 X_2 + 101.892 X_1 X_3 - 20.183 X_2 X_3 - 20.608 X_1 X_2 X_3$$

Pour optimiser la dureté de l'acier allié 42CrMo4 à 850°C, il faut trouver un équilibre entre le temps de maintien et la vitesse de refroidissement.

Dans le cadre de cette étude à l'aide de la méthode des plans d'expériences, nous avons analysé l'influence de trois paramètres thermiques sur la dureté finale du matériau traité :

- **X_1 : Température d'austénitisation**
- **X_2 : Temps de maintien**
- **X_3 : Vitesse de refroidissement**

Les résultats obtenus à partir des diagrammes de contours montrent que la dureté est maximisée lorsque les trois paramètres sont à leur niveau le plus bas dans la plage étudiée.

Plus précisément :

- Une température d'austénitisation basse ($X_1 = -1$) permet d'éviter le grossissement des grains, favorisant une structure plus fine et plus dure.
- Un temps de maintien court ($X_2 = -1$) limite la croissance des grains et la dissolution excessive des carbures, maintenant ainsi une bonne capacité de durcissement.
- Une vitesse de refroidissement plus lente ($X_3 = -1$) favorise la formation de structures bainitiques ou de martensite tempérée, plus dures et plus stables que celles issues d'un refroidissement trop rapide.

Ainsi, l'interaction entre les paramètres est faible, ce qui confirme que leurs effets sur la dureté sont essentiellement additifs et indépendants dans la plage explorée.

En conclusion, pour maximiser la dureté, il est recommandé d'utiliser :

- Une température d'austénitisation basse,
- Un temps de maintien réduit et un refroidissement relativement lent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Afnor, Produits sidérurgique, Aciers pour construction, Recueil de normes françaises, 1988.
- [2] J. Barralis, G. Maeder, Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation, Nathan, Avril 1990.
- [3] Maza Samira, Elaboration et étude des propriétés physiques et mécaniques des surfaces des aciers cémentés, mémoire de magister, faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, université de M'SILA, 2009.
- [4] S.bensaada, Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes, polycop, Université Mohamed khider ,2019.
- [5] François – Xavier Goudezeune, Construction Métallique, *TCE, L'école d'ingénieurs du CESI, Centre de Paris.*
- [6] MyriamOlivier, Les métaux dans la construction, Publication Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, France, 2006.
- [7] Djouad Maamar, Etudes des propriétés mécaniques, caractéristiques des alliages ferreux, Mémoire de fin d'études de Master, Université de Mostaganem.
- [8] A. A. Gamal, Etude des processus physiques et physico-chimiques intervenant au cours des traitements de revenu d'aciers à haute résistance. Etude de leurs incidences sur les propriétés mécaniques, la ténacité et l'apparition des phénomènes de fragilité, Thèse de docteur ingénieur, Université Paris VI, Mai 1980.
- [9] J. Philibert et al. Métallurgie, du minerai au matériau, Éditions Dunod, 2e édition, 2002, (ISBN 978-2-10-006313-0), p. 621.
- [10] DJ. Chaouch, étude expérimentale du comportement mécanique de l'acier faiblement allié 42CD4, these de doctorat, Université de mostaganem, 16 Janvier 2012.
- [11] Muriel HANTCHERLI, Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés, Thèse de docteur ingénieur, école Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 avril 2010.
- [12] Guy Murry, Traitements thermiques dans la masse des aciers. Partie 1, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 126, Centre français d'exploitation 2002.
- [13] J. Barralis, G. Maeder, Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection « Les précis AFNOR/Nathan », 2005 (ISBN 978-2-09-179582-9), p. 102.

- [14] A. Ataiwi, P. Lehr, Influence des traitements thermiques de revenu après trempe sur le comportement mécanique sous sollicitations monotones ou cycliques de l'acier à haute résistance 35NCDV12, Rapport de recherche ENSTA N° 195, Janvier 1985.
- [15] KHERIF Rachid, Traitement thermique d'un acier à outils de travail à chaud, Master-Mémoire de Fin d'Etudes, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Biskra Juin 2017.
- [16] R. Levêque, traitements thermiques des aciers à outils, techniques de l'ingénieur m 1137,7-1981.
- [17] A. Habbar, Méthode statistique de planification extrême des expériences, Polycopié, Université de Mostaganem 2006.
- [18] S. Vivier, Strategy of optimisation with methods of experimental designs and application to electronic devices modelled by finite elements, Ph. D thesis, Ecole centrale de Lille, France (2002).
- [19] YAHIAOUI Idris, Les plans d'expériences, Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré, Université A. MIRA – Bejaia, Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés, 2014/2015.
- [20] F. Gillon, Modélisation et optimisation par les plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques, Thèse de doctorat, Université de Lille, 1997.
- [21] S. Adjabi. Méthodes statistiques de la prévision. Ed. LAMOS université Bejaia.
- [22] J. Goupy, Les plans d'expériences, Revue Modulad. 34 (2006) 74-116.
- [23] J. Goupy. Modélisation par les plans d'expériences » Technique de l'ingénieur R275.
- [24] I. Kouidri, Maitrise de l'encrassement pour une capitalisation des échangeurs de chaleur, these de doctorat LMD 3^{ème} cycle, Université de Relizane, Faculté de Technologie Département de Génie Mécanique, 2023/2024.