



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE -
ANNABA

Département de Génie Minier, Métallurgie et Matériaux (G3M)

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité :

SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

Présenté par

Younes HAZIL

Etude de l'évolution des propriétés des fils en acier SAE 1008 de TREFAL REGHAIA

Encadré par

Dr. Salima BENDEBANE

ENSTI-Annaba

Membres du jury :

- | | | |
|--------------------|-----------|-----------------------------|
| ▪ LEMBOUB Samia | Président | Etablissement d'affiliation |
| ▪ BENDJEDOU Louiza | Examineur | Etablissement d'affiliation |
| ▪ TAIBI Yasmina | Examineur | Etablissement d'affiliation |

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien, leurs conseils et leur encouragement ont été précieux tout au long de ce parcours.

*En particulier, nous remercions sincèrement notre encadrante, **Salima BENDEBANE**, pour son dévouement, sa disponibilité et son expertise qui ont grandement enrichi notre travail. Sa patience et ses conseils éclairés ont été d'une aide inestimable, et nous lui sommes profondément reconnaissants pour sa précieuse contribution.*

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour leur temps et leur attention consacrés à l'évaluation de ce mémoire. Leurs commentaires et suggestions constructives ont été extrêmement bénéfiques pour l'amélioration de notre travail.

*Nous exprimons également notre reconnaissance envers les professeurs du Département de génie des matériaux pour leur enseignement de qualité et leur soutien tout au long de notre formation. Un grand merci est adressé à Mme **GUADDOUCHE Zoubir** et à toute l'équipe du laboratoire physique de l'Entreprise des Industries du Fil de Reghaia (TREFAL) pour leur collaboration précieuse et leur expertise technique, qui ont grandement contribué à la réussite de nos expériences et à la collecte de données.*

Enfin, nous sommes reconnaissants envers nos familles, nos parents et nos proches pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement constant. Leur amour et leur confiance ont été une source de motivation importante tout au long de ce projet.

ملخص

تتناول هذه المذكرة بالتفصيل تطور خصائص الفولاذ SAE 1008 المعالج بطريقتين مختلفتين: سحب الأسلاك والحرارة. في الواقع، تتضمن الدراسة عدة اختبارات أساسية: الجر، والمرونة، والصلابة، والصلابة الدقيقة، والكثافة، بالإضافة إلى اختبار مقاومة التآكل، حيث تم غمر الفولاذ في محلول HCl. لقد وجد أن المعالجة الحرارية أدت إلى تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للفولاذ SAE 1008 بشكل ملحوظ، ومن خلال اختبار التآكل في محلول 1 موالر من حمض الهيدروكلوريك، وجد أن المقاومة المرضية للتآكل ضرورية لضمان مائة أسلاك التسليح والخرسانة. البيئات المسببة للتآكل.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ SAE 1008، المعالجة الحرارية، سحب الأسلاك، الخطط التجريبية، اختبارات الشد، المرونة، الصلابة، الصلابة الدقيقة، الكثافة، التآكل.

Abstract

This study examines in detail the evolution of the properties of SAE 1008 steel treated by two different methods: drawing and heat treatment. Indeed, the study includes several essential tests: tensile, impact, hardness, micro-hardness, density, as well as a corrosion resistance test, where the steel was immersed in a 1M HCl solution.

It was found that the heat treatment considerably improved the physical, chemical and mechanical properties of SAE 1008 steel. Corrosion testing in a 1 M HCl solution showed satisfactory corrosion resistance, crucial for ensuring the durability of reinforcing and concrete wires in corrosive environments.

Key words: SAE 1008 steel, heat treatment, drawing, experimental designs, traction tests, impact strength, hardness, micro-hardness, density, corrosion.

Résumé

Ce mémoire examine en détail l'évolution des propriétés de l'acier SAE 1008 traité par deux méthodes différentes tréfilage et thermique. En effet, l'étude inclut plusieurs essais essentiels : traction, résilience, dureté, micro-dureté, densité, ainsi qu'un test de résistance à la corrosion, où l'acier a été immergé dans une solution de HCl à 1M.

Il a été trouvé que le traitement thermique a considérablement amélioré les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de l'acier SAE 1008. D'après le test de corrosion dans une solution de HCl 1 M, il a été constaté qu'une résistance satisfaisante à la corrosion, cruciale pour assurer la durabilité des fils d'armature et de béton dans des environnements corrosifs.

Mots-clés : Acier SAE 1008, traitement thermique, tréfilage, plans d'expérience, essais de traction, résilience, dureté, micro-dureté, densité, corrosion.

Sommaire

REMERCIEMENTS	2
المخلص	3
ABSTRACT	3
RESUME	3
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	8
INTRODUCTION GENERALE	9
Chapitre 1. Description de l'entreprise du stage	
1.2. Introduction	10
1.2. Historique	10
1.3. Missions principales de l'entreprise	10
1.4. Organisation	10
1.5. Gamme des produits de TREFAL	11
1.5.1. Les Treillis Soudés (TS)	12
1.5.2. Les Poutrelles Métalliques Légères (PML)	12
1.5.3. Les Fils Tréfilés Clairs (F.T.C)	12
Chapitre 2. Etat de l'art et recherche bibliographique	
2.1. Introduction	13
2.2. Propriétés physiques et mécaniques de l'acier	13
2.3. Classification des aciers	13
2.4. Déformation plastique des métaux et les alliages métalliques	13
2.5. Procédé de tréfilage	14
2.5.1. Description du procédé de tréfilage	14
2.5.1.1. Préparation du fil	14
2.5.1.2. Étape de lubrification	15
2.5.1.3. Passage à travers les filières	15
2.5.1.4. Tréfilage	15
2.5.1.5. Finition	15
2.5.2. Avantages du tréfilage	15
2.5.3. Applications du tréfilage	15
Chapitre 3 : Matériaux et techniques expérimentales	
3.1 Introduction	16
3.2. Matériau utilisé	16
3.3. Préparation des échantillons	16
3.3.1. Préparation des échantillons pour le traitement thermique	17
3.3.2. Préparation des échantillons pour des tests électrochimique	17

3.4. Technique de caractérisation (MEB-EDS)	17
3.5. Essais mécaniques	17
3.5.1. Essai de traction	18
3.5.2. Essai de résilience	18
3.6. Propriété physique	19
3.6.1. Rugosité	19
3.6.2. Essais de dureté	19
3.6.3. Essai de microdureté	21
3.6.4. Mesure de la densité	21
3.7. Traitements thermiques	22
3.8. Essais électrochimiques	22
3.9. Méthode des plans d'expérience	22
3.9.1. Terminologie	22
3.9.2. Méthode des surfaces de réponse	23
3.10. Plan de Box-Behnken	23
Chapitre 4: Résultats expérimentaux et discussion	
4.1. Introduction	25
4.2. Traitement thermique	25
4.2.1. Diagramme de Pareto	25
4.2.2. Effets principaux	26
4.2.3. Modèle mathématique	27
4.2.4. Surface de réponse	28
4.2.4.1. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs T_{aust} - mode de ref. et HDR	28
4.2.4.2. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs T_{aust} - tm. et HDR	28
4.2.4.3. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs tmt- mode de ref. et HDR	29
4.2.4.4. Optimisation	29
4.3. Propriétés mécaniques et physique des différents échantillons	30
4.3.1. Essai de traction	30
4.3.2. Essai de résilience	31
4.3.3. Etude comparative	31
4.4. Test électrochimique	32
4.4.1. Evolution du potentiel de circuit ouvert	32
4.4.2. Courbes de polarisation	33
4.9. Conclusion générale	33

Liste des Figures

Figure 1.1 : Organigramme de l'entreprise TREFAL

Figure 1.2. Gamme des produits commercialisés par TREFAL

Figure 2.1. Déformation plastique des métaux

Figure 3.1. Echantillons d'acier SAE1008

Figure 3.2. Tronçonneuse métallographique.

Figure 3.3. Echantillons coupés et enrobés

Figure 3.4 : Polisseuse mécanique

Figure 3.5. Microscopie Electronique à Balayage

Figure 3.6 Machine de traction Zwick Roell Z050

Figure 3.7. Machine d'essai de Choc Zwick Roell HIT50P

Figure 3.8. Rugosimètre model 3d

Figure 3.9. Duromètre Brinell

Figure 3.10. Duromètre Rockwell

Figure 3.11. Microduromètre Vickers

Figure 3.12. Four de traitement thermique

Figure 3.13. Points sur le diagramme représentent les essais expérimentaux effectués.

Figure 4.1. Diagramme de Pareto

Figure 4.2. Effets principaux des facteurs étudiés sur la dureté de l'acier SAE 1008 traité thermiquement

Figure 4.3. Effet d'interaction entre les facteurs étudiés

Figure 4.4. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de T_{aust} - mode de refroidissement à $t_m = 20$ min

Figure 4.5. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de T_{aust} - t_m au niveau maximum pour le mode de refroidissement

Figure 4.6. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de t_m - mode de refroidissement à $T_{\text{aust}} = 1000^\circ\text{C}$

Figure 4.8. Courbe de traction de l'acier SAE1008

Figure 4.9. Microstructure de l'acier SAE 1008 Brut (a), Tréfilé (b) et traité thermiquement (c).

Figure 4.10. Évolution du potentiel de corrosion de SAE 1008 immergé pendant 30 min.

Figure 4.11. Courbes de polarisation pour les trois échantillons immergés dans une solution de HCl 1 M à 25°C .

Liste des Tableaux

Tableau 3.1. Composition chimique l'acier SAE 1008

Tableau 4.1. Facteurs et domaines étudiés.

Tableau 4.2. Matrice d'expérience des facteurs et des réponses selon le plan Box-Behnken

Tableau 4.3. Résultats de critères d'optimisation

Tableau 4.4. Tableau des résultats de l'essai de traction

Tableau 4.5. Etude Comparative

Tableau 4.6. Analyse EDS des différents échantillons de l'acier SAE 1008

Tableau 4.7. Paramètres électrochimiques des différents échantillons à partir de courbes Tafel.

Introduction Générale

L'acier est le troisième métal le plus utilisé dans le monde après le cuivre et l'aluminium en raison de ses excellentes propriétés chimiques, physiques et mécaniques [1]. Il est largement employé dans le secteur de la construction pour diverses applications telles que la fabrication de barres d'armature de fils de béton de solives et d'autres éléments structuraux toutefois une évaluation approfondie de ses propriétés est nécessaire pour confirmer ses performances dans des conditions réelles [2].

Ce mémoire constitue une étude des propriétés physiques et chimiques de l'acier SAE 1008 utilisé dans la fabrication de barres d'armature et de fils de béton son objectif est de fournir une compréhension complète de ce matériau en examinant en détail ses caractéristiques clés et ses performances physiques et chimiques à travers une série de tests expérimentaux.

L'objectif principal de cette étude est de comparer l'influence des deux méthodes de traitement différentes à savoir le tréfilage et le traitement thermique sur les propriétés de l'acier SAE 108. Pour cela, plusieurs analyses ont été examinées afin d'évaluer les propriétés mécaniques essentielles telles que la résistance à la traction la résilience et la dureté pour déterminer sa capacité à résister aux contraintes et aux charges dynamiques examiner. Les propriétés chimiques de l'acier notamment sa densité et sa résistance la corrosion pour comprendre son comportement dans des conditions environnementales variées

Le manuscrit est scindé en plusieurs chapitres :

Dans le premier chapitre, une présentation détaillée de l'entreprise TREFAL a été effectuée.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de traitement utilisé (thermique et tréfilage) ainsi que la méthode statistique appliquée pour optimiser le procédé de traitement thermique.

Le troisième chapitre décrit le matériau utilisé, sa composition chimique ainsi que les caractérisations utilisées à savoir la traction, résilience, micro-dureté, dureté, la densité, MEB-EDS et des tests électrochimiques.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats expérimentaux et leurs interprétations suivies d'une conclusion générale et quelques recommandations clôturant ce mémoire.

Chapitre 1. Description de l'entreprise du stage

1.1. Introduction

TREFAL est une entreprise publique dénommée TREFILERIE D'ALGER, elle est située dans la zone industrielle de Reghaïa à l'Est d'Alger. Elle fait partie des 6 filiales que composent le groupe TPL « Transformation des Produits Longs » dont le siège est situé à Oran.

1.2. Historique

En Juillet de l'année 1979, l'unité est entrée dans sa phase primaire de production, sa mission principale est la production et la commercialisation des Treillis Soudé et des Poutrelles Métalliques Légères, produits qui récemment étaient l'œuvre de nos artisans ferrailleurs. TREFAL capitalise une expérience de plus de 30 ans dans la fabrication des produits destinés principalement au secteur de l'habitat et des travaux publics. En 1998, une deuxième restructuration a fait de l'unité TSP/R une filiale à part entière dotée d'un capital social, d'un Conseil d'administration et de statut juridique d'une SPA.

1.3. Missions principales de l'entreprise

Les activités fondamentales de l'entreprise se situent dans la fabrication et la commercialisation des produits destinés au secteur du bâtiment, des travaux publics et de la petite transformation.

Le cœur du métier de TREFAL est le tréfilage, c'est à partir de ce processus clé que les produits sont réalisés en subissant d'autres transformations intermédiaires tels que le Dressage et le soudage.

L'opération de tréfilage permet d'élever artificiellement la résistance du métal et de diminuer son allongement conformément aux normes spécifiant les caractéristiques des produits.

1.4. Organisation

À travers l'organigramme officielle de TREFAL (figure 1.1), l'entreprise est dirigée par :

- Un président directeur général qui assure aussi la présidence du conseil d'administration,
- Un assistant chargé du contrôle de gestion,
- Un assistant chargé de l'audit interne,
- Un assistant chargé du management de la qualité,
- Un chef de département technique et de plusieurs services,
- Un chef de département commercial et de plusieurs services,
- Un directeur de l'administration et finances dotée de quatre services : Comptabilité, Finance, GRH, MGX, HSE et une cellule Juridique et Informatique.

L'organigramme est de type fonctionnel, il ne fait apparaître que les lignes hiérarchiques, les interfaces sont partiellement visibles qu'à travers la cartographie des processus et leurs fiches de descriptions établies dans le cadre de la mise en place du système de management de la qualité.

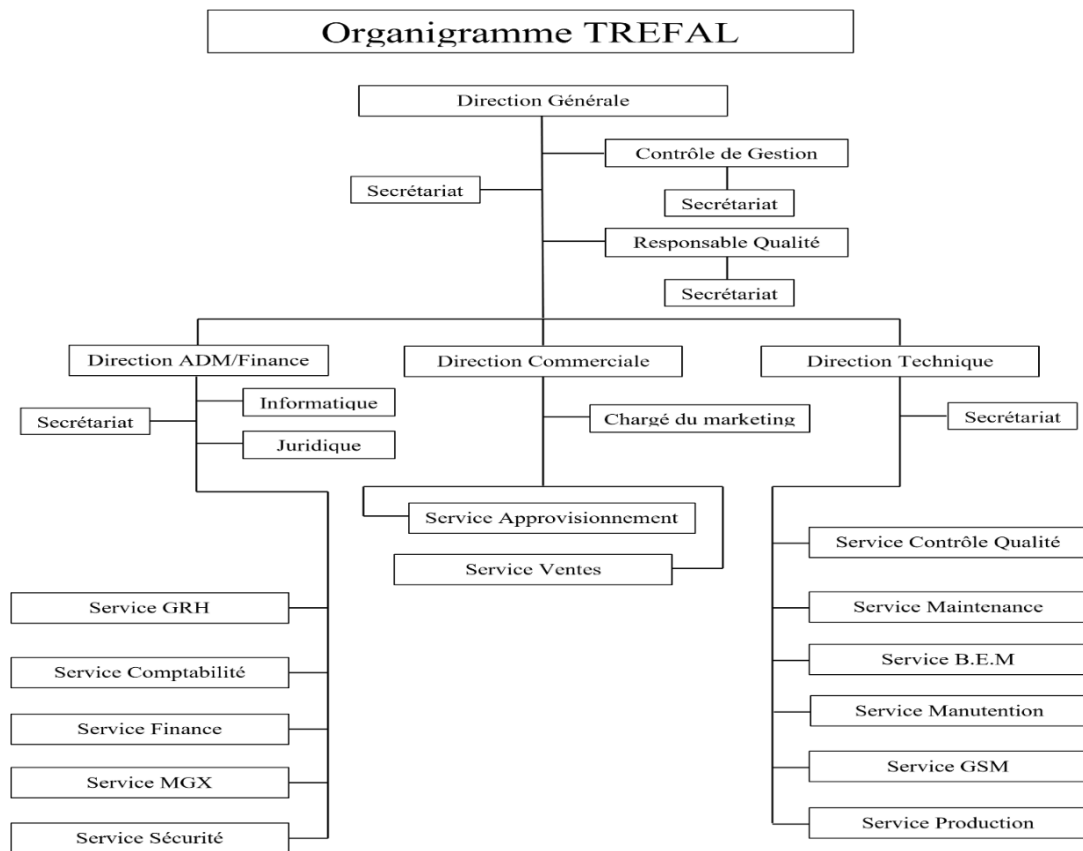


Figure 1.1 : Organigramme de l'entreprise TREFAL

1.5. Gamme des produits de TREFAL

Le fil machine est considéré comme matière première pour produire TS, PML et FTC. Ce fil est un acier non allié obtenu par laminage à chaud au niveau d'El-Hadjar.



Fils Tréfilés Clair



Poutrelles Métalliques



Treillis Soudés

Figure 1.2. Gamme des produits commercialisés par TREFAL

1.5.1. Les Treillis Soudés (TS)

Le treillis métallique soudé est fabriqué à partir de fils d'acier lisses ou ondulés avec des encoches qui sont étroitement assemblés en un treillis carré ou rectangulaire par soudage électrique sur une machine automatique.

Le treillis métallique soudé est fabriqué sous forme de panneaux ou de rouleaux de tailles standard ou spéciales selon les exigences du client.

Le TS est utilisé pour la réalisation des dalles en béton armé reposant sur le sol et murs porteurs, Piste d'aérodrome

1.5.2. Les Poutrelles Métalliques Légères (PML)

Les poutrelles métalliques sont des armatures légères faites en fils tréfilés lisses ou crantés. Elle est fabriquée en continue sur des machines automatiques. La membrure supérieure et les membrures inférieures sont assemblées aux étriers continus en forme de ZIGZAG par soudage électrique, permettant une bonne rigidité et une excellente stabilité.

La PML est utilisée pour la réalisation Des planchers nervurés et préfabriqués, Des poutres, des dalles, etc.

5.3. Les Fils Tréfilés Clairs (F.T.C)

Initialement il est considéré comme un produit semifini fabriqué à la demande du client. TREFAL fabrique et commercialise ce produit sous forme de fils tendus lisses selon les dimensions requises par le client, ou livré en faisceaux ou bobines pour répondre à des besoins particuliers. Le F.T.C est utilisé pour la réalisation de portes manteaux métalliques, égouttoir, vaisselle

Chapitre 2. Etat de l'art et recherche bibliographique

2.1. Introduction

Ce chapitre donne un bref aperçu sur l'acier et ses propriétés physiques et mécaniques, suivi d'une revue de la littérature sur la déformation plastique des métaux et les alliages métalliques, les différents types de déformation plastique et les mécanismes responsables de ce processus. Les principes de base du tréfilage, les outils et équipements de tréfilage industriel ainsi que les différentes machines utilisées en tréfilage seront également présentées. De plus, les effets du traitement thermique sur les propriétés mécaniques et microstructurales du matériau formé seront présentés.

2.2. Propriétés physiques et mécaniques de l'acier

L'acier est un matériau largement utilisé dans de nombreux domaines grâce à ses excellentes propriétés physiques et mécaniques. Il présente une densité d'environ $7,85 \text{ g/cm}^3$ et un point de fusion élevé entre 1450°C et 1520°C . Il est un bon conducteur de chaleur et d'électricité, bien que moins efficace que le cuivre. Ferromagnétique, l'acier est attiré par les aimants. Mécaniquement, il offre une large gamme de résistance à la traction (250 MPa à plus de 2000 MPa) et de limites élastiques (200 à 2500 MPa), tout en étant ductile et résilient, avec une dureté variable mesurée en Brinell ou Rockwell. Sa résistance à la fatigue est notable, et bien que susceptible à la corrosion, des variantes inoxydables existent. Facilement usinable et modifiable par traitements thermiques, l'acier se distingue par sa polyvalence et ses performances adaptatives.

2.3. Classification des aciers [4]

La classification des aciers se fait principalement selon leur composition chimique, leurs propriétés mécaniques et leurs applications. Selon les normes EN 10027 - 117 et - 218, on distingue quatre catégories :

- Les aciers non-alliés d'usage général (construction).
- Les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, etc.
- Les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu ; 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, les roulements, etc.

- Les aciers fortement alliés :
- Les aciers inoxydables,
- Les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forêts.

2.4. Déformation plastique des métaux et les alliages métalliques

La déformation plastique des métaux et des alliages métalliques est un processus par lequel ces matériaux subissent une transformation permanente sous l'effet d'une contrainte, essentiellement due au déplacement des dislocations dans la structure cristalline. Ce mouvement est influencé par la composition chimique, la structure cristalline, la taille des grains et la température, où des éléments d'alliage et des traitements thermiques peuvent renforcer le matériau en bloquant les dislocations. Les mécanismes de glissement et de jumeaux atomiques facilitent cette déformation, exploitée dans divers procédés industriels comme le laminage et le forgeage pour façonner les métaux sans fracture. La compréhension de la déformation plastique est cruciale pour améliorer la résistance, la ductilité et la durabilité des matériaux dans les applications industrielles.

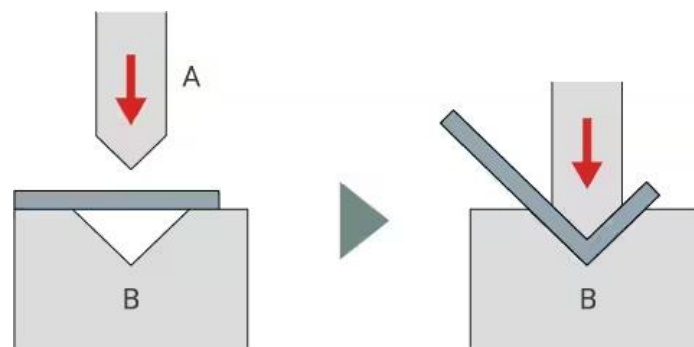


Figure 2.1. Déformation plastique des métaux

2.5. Procédé de tréfilage [3]

Le tréfilage est un procédé de fabrication utilisé pour réduire le diamètre de fils métalliques tout en augmentant leur longueur. Ce procédé est couramment utilisé pour produire des fils métalliques à partir de métaux comme l'acier, le cuivre, l'aluminium et leurs alliages. Voici une description détaillée du procédé de tréfilage :

2.5.1. Description du procédé de tréfilage

2.5.1.1. Préparation du fil

- ❑ **Matériau brut :** Le procédé commence avec une tige métallique appelée "ébauche", qui a un diamètre plus grand que le fil fini souhaité.
- ❑ **Nettoyage :** L'ébauche est nettoyée pour enlever toute impureté ou oxydation de sa surface. Cela peut être fait par des procédés chimiques ou mécaniques.

2.5.1.2. Étape de lubrification

Un lubrifiant est appliqué sur l'ébauche pour réduire la friction pendant le tréfilage et protéger les outils de tréfilage de l'usure excessive.

2.5.1.3. Passage à travers les filières

- ❑ **Filière** : Le tréfilage implique de tirer le fil à travers une série de matrices coniques appelées filières. Chaque filière a un diamètre légèrement inférieur à la précédente, ce qui permet de réduire progressivement le diamètre du fil.
- ❑ **Réduction progressive** : Le fil est tiré à travers plusieurs filières successives jusqu'à atteindre le diamètre final souhaité. La réduction progressive permet de contrôler la déformation plastique et d'éviter la rupture du fil.

2.5.1.4. Tréfilage

- ❑ **Force de traction** : Le fil est tiré à travers les filières par une force de traction appliquée à l'extrémité du fil. Cette traction est généralement effectuée par des bobines de tirage motorisées.
- ❑ **Déformation plastique** : À mesure que le fil passe à travers chaque filière, il subit une déformation plastique, réduisant son diamètre et augmentant sa longueur.

2.5.1.5. Finition

- ❑ **Traitement thermique** : Après le tréfilage, le fil peut subir des traitements thermiques pour soulager les contraintes internes accumulées pendant le processus de tréfilage.
- ❑ **Revêtement** : Le fil fini peut également recevoir un revêtement pour améliorer ses propriétés, comme la résistance à la corrosion.

2.5.2. Avantages du tréfilage

- **Précision dimensionnelle** : Le tréfilage permet de produire des fils avec des tolérances dimensionnelles très précises.
- **Propriétés mécaniques améliorées** : Le processus de tréfilage améliore la résistance à la traction et la dureté du fil en raison de l'écrouissage.
- **Surface lisse** : Le tréfilage produit des fils avec des surfaces lisses et uniformes.

2.5.3. Applications du tréfilage

Le tréfilage est utilisé dans une large gamme d'industries et d'applications, telles que :

- **Câblage électrique** : Production de fils de cuivre et d'aluminium pour les câbles électriques.
- **Industrie automobile** : Fabrication de ressorts, de rayons de roues et de câbles de commande.
- **Construction** : Production de fils d'acier pour le béton armé et les treillis métalliques.
- **Bijouterie** : Fabrication de fils fins pour les bijoux et les accessoires décoratifs.

Chapitre 3 : Matériaux et techniques expérimentales

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons donné en premier lieu un bref aperçu sur le matériau utilisé dans notre étude qui est l'acier SAE 1008. En second lieu, et avant de commencer la procédure expérimentale, nous avons présenté le matériel utilisé ainsi que les différentes techniques d'analyses réalisées.

Les techniques électrochimiques sont à leur tour présentées, de manière à souligner leur intérêt et leur pertinence dans l'étude de la résistance à la corrosion des matériaux traités.

3.2. Matériau utilisé

L'étude a été portée sur des échantillons en acier de nuance SAE 1008 utilisé pour la fabrication de barres d'armature, de fils à béton, de poutrelles et d'autres composants structurels (Figure 3.1.a). Le découpage de ce fils en 1,5 cm de longueur (figure 3.1.b.) a été réalisé à l'aide d'une tronçonneuse métallographique type Mecatome T210 (Figure 3.2).



(a) : fils complet

(b) échantillons découpés

Figure 3.1. Echantillons d'acier SAE1008



Figure 3.2. Tronçonneuse métallographique.

Étant donné que la composition chimique de l'acier est la principale caractéristique qui différencie ses qualités et propriétés. A cet effet, il est nécessaire d'effectuer une analyse élémentaire de l'acier SAE 1008. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Composition chimique l'acier SAE 1008

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N(PPM)	C _{eq} (%)
0.09	0.44	0.41	0.012	0.011	52	0.16

3.3. Préparation des échantillons

3.3.1. Préparation des échantillons pour le traitement thermique

Afin de minimiser les contraintes résiduelles et les défauts de surface, les échantillons sont découpés en 1,5 cm de longueur. Ensuite, ils sont nettoyés soigneusement pour éliminer toute contamination superficielle à l'aide de l'éthanol. Une fois propres, les échantillons sont séchés à l'air.

3.3.2. Préparation des échantillons pour des tests électrochimique

Le substrat découpé en 1,5 cm de longueur subit un enrobage à froid avec un mélange d'une résine époxy avec son durcisseur selon les proportions recommandées, visant à isoler certaines zones et à protéger les parties non concernées par les mesures (figure 3.3). Ensuite, les échantillons enrobés subissent un polissage avec une polisseuse mécanique de type PRESI MECATECH P260 (Figure 3.4) en utilisant des papiers abrasifs de différentes tailles (240, 300, 600, 800, 1000, 1200 et 1500). Après le polissage, l'échantillon est nettoyé à l'aide de l'éthanol pour éliminer toute contamination organique ou résidu de polissage. Une fois nettoyé, l'échantillon est séché. Il est ensuite prêt à être monté dans la cellule électrochimique, où seule une partie définie de la surface est exposée à l'électrolyte pour des mesures précises. Cette préparation rigoureuse est essentielle pour minimiser les artefacts expérimentaux et obtenir des données électrochimiques fiables.



Figure 3.3. Echantillons coupés et enrobés



Figure 3.4 : Polisseuse mécanique

3.4. Technique de caractérisation (MEB-EDS)

Les observations des échantillons ont été réalisées par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Le MEB est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface de l'échantillon. Le microscope utilisé est marque FEI de type Quanta 250 piloté par le logiciel ZEISS (figure 2.3) Il est à une microanalyse (EDS) qui permet l'analyse par rayons X à dispersion d'énergie des divers éléments chimiques de l'échantillon.



Figure 3.5. Microscopie Electronique à Balayage

3.5. Essais mécaniques

3.5.1. Essai de traction

L'essai de traction est un procédé expérimental largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique des métaux et des alliages. Il consiste à appliquer à une éprouvette un effort de traction et à mesurer l'allongement correspondant, ou bien à imposer un allongement et à mesurer l'effort de traction.

Dans une machine d'essai de traction, les éprouvettes sont solidement maintenues par leur tête entre les mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette de manière à ce que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités. Les essais de traction sont réalisés à température ambiante sur les fils d'acier étudiés avec une vitesse de déplacement de 2mm/min. Ces essais sont effectués au laboratoire physique de (ENTPL) TEFAL d'Alger, sur une machine automatisée de type ZWICK-ROELL Z100 (figure 3.6), équipée d'une capacité de mesure de 100 kg et d'un extensomètre de longue course ($L_0 = 200$ mm). Cette machine est commandée et pilotée par un ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition des données.



Figure 3.6 Machine de traction Zwick Roell Z050

3.5.2. Essai de résilience

Les essais de résilience ont été effectués au sein du laboratoire des essais mécaniques au niveau du département de métallurgie de l'université Badji Mokhtar ANNABA.

L'essai a été réalisé avec une machine de résilience « Zwick Roell HIT50P ». La machine est équipée d'une gamme de fonctionnalités pour garantir la précision et la fiabilité des essais. Tels que les capteurs de force et de déplacement qui permettent de mesurer avec précision les valeurs de force appliquée et de déformation subie par l'échantillon. De plus, un système de mesure d'énergie intégré est présent, permettant de quantifier l'énergie absorbée par l'échantillon lors de l'essai de résilience.

L'essai de résilience consiste à frapper un échantillon normalisé du matériau à l'aide d'un marteau pendule. Le marteau pendule est généralement équipé d'un couteau en V ou d'une encoche en U à son extrémité inférieure, positionnée face à l'échantillon. Le marteau pendule est soulevé à une hauteur spécifique, puis relâché, entraînant sa chute et la frappe de l'échantillon.



Figure 3.7. Machine d'essai de Choc Zwick Roell HIT50P

Lorsque le marteau pendule frappe l'échantillon, il lui transfère de l'énergie. Le matériau absorbe cette énergie et subit une déformation. La quantité d'énergie absorbée avant la rupture de l'échantillon est mesurée et enregistrée. Cette mesure, connue sous le nom d'énergie de rupture ou d'énergie d'impact, est utilisée pour évaluer la résilience du matériau.

3.6. Propriété physique

3.6.1. Rugosité

La rugosité de surface des échantillons est mesurée à l'aide d'un rugosimètre. Il se compose généralement d'une sonde ou d'un stylet qui est déplacé le long de la surface à mesurer. Lorsque la sonde se déplace, elle enregistre les changements de hauteur ou de profondeur et fournit des données sur la rugosité de la surface.



Figure 3.8. Rugosimètre model 3d

3.6.2. Essais de dureté

Les essais de dureté ont été faits avec des duromètres Brinell et Rockwell, au niveau de l'atelier de métallurgie de l'école nationale supérieure de technologies et d'ingénierie ANNABA

- ❑ **Essai Brinell :** L'essai utilise comme pénétrateur une bille de diamètre D en acier. On applique une charge sur l'échantillon et on mesure le diamètre de l'empreinte obtenue sur la surface



Figure 3.9. Duromètre Brinell

- ❑ **Essai Rockwell :** L'essai consiste à faire pénétrer une bille en acier trempé (1,58mm) ou en diamant (pour les matériaux plus durs). La dureté représente la différence de profondeur de pénétration obtenue après l'application d'une précharge initiale suivie d'une charge majeure.



Figure 3.10. Duromètre Rockwell

3.6.3. Essai de microdureté

L'essai de microdureté a été fait à l'aide d'un microduromètre Vickers au niveau de laboratoire de métallurgie de l'école nationale supérieure de technologies et d'ingénierie ANNABA. Pour cet essai on utilise un pénétrateur en diamant de forme pyramide et d'une base carrée. On applique une charge de 250Kgf pendant $s=10s$ et on mesure la diagonale de l'empreinte laissée sur la surface de l'échantillon.



Figure 3.11. Microduromètre Vickers

3.6.4. Mesure de la densité

Pour le calcul de la densité on utilise la méthode de pesée par immersion en suivant les étapes suivantes :

- a) **Préparation de l'échantillon** : nettoyage de l'échantillon et élimination des impuretés.
- b) **Mesure de la masse** : On utilise une balance électronique pour peser la masse de l'échantillon. On note la masse obtenue M_1 .
- c) **Mesure du volume initial** : on remplit un éprouvette gradué avec de l'eau distillé jusqu'à un niveau connu qu'on note V_1 .
- d) **Mesure du volume final** : on place délicatement l'échantillon dans l'eau du récipient gradué jusqu'à ce qu'il soit complètement immergé et on note le nouveau niveau de l'eau, qui sera noté comme V_2
- e) **Calcul de la densité** : On utilise la formule de la densité pour calculer la densité du matériau.

$$D = \frac{\rho_{solide}}{\rho_{eau}} = \frac{m_{solide}}{V_2 - V_1}$$

avec $\rho_{solide} = \frac{m_{solide}}{V_2 - V_1}$

3.7. Traitements thermiques

Des traitements thermiques ont été effectués dans un four électrique à sole de type Nabertherm GmbH, permettant d'atteindre une température maximale de 1200 °C. Un régulateur électronique contrôle la température et la vitesse de chauffe (Figure 3.12)

Dans le but d'optimiser les paramètres de traitements thermiques influençant sur la microstructure, la dureté et le comportement à la corrosion une planification expérimentale a été examinée en appliquant le plan Box Bhenken. A cet effet on a choisi de tester trois paramètres à savoir : la température d'austénitisation, le type de refroidissement ainsi que le temps de maintien.



Figure 3.12. Four de traitement thermique

3.8. Essais électrochimiques

Les essais électrochimiques sont des techniques essentielles pour étudier les propriétés de corrosion et le comportement électrochimique des matériaux. L'OCP (Open Circuit Potential) mesure le potentiel électrochimique naturel d'un matériau sans application de courant, fournissant des informations sur sa tendance à la corrosion. Les courbes de Tafel sont obtenues en appliquant un potentiel variable et en mesurant le courant correspondant, ce qui permet de déterminer les paramètres cinétiques de corrosion tels que les densités de courant de corrosion et les potentiels de corrosion. L'ESI (Electrochemical Impedance Spectroscopy) analyse la réponse d'un matériau à un signal de courant alternatif sur une gamme de fréquences, permettant de modéliser les mécanismes de corrosion et les propriétés de la couche passive en termes de résistance et de capacité électrochimiques. Ensemble, ces techniques fournissent une évaluation complète de la performance électrochimique et de la durabilité des matériaux dans divers environnements.

3.9. Méthode des plans d'expérience

3.9.1. Terminologie

Réponse : Une réponse consiste à une quantification des performances du système étudié [4].

Facteurs : Les paramètres que l'on fait varier au cours des essais et sensés influencer sur la variation de la réponse (les variables que l'on désire étudier) [5].

Domaine d'un facteur : Un facteur varie généralement entre deux bornes à savoir : la borne inférieure notée (-1) et la borne supérieure notée (+1). L'ensemble des valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas (-1) et le niveau haut (+1), est appelé domaine d'un facteur ou bien domaine de variation [6].

Domaine d'étude : Un seul facteur est représenté par un axe orienté, et s'il y a deux facteurs, le second est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. Ce dernier est disposé orthogonalement au premier, la réunion des domaines de variations de chaque facteur définit le domaine d'étude [7].

Interaction : L'effet pour lequel l'influence apparente d'un facteur sur une variable de réponse dépend d'un ou de plusieurs facteurs. L'interaction indique une incohérence de l'effet principal d'un facteur sur la réponse selon le niveau d'un autre facteur [8].

Matrice d'expérience : Une matrice d'expérience définit les essais à réaliser. Le terme essai est l'équivalent de point d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expérience. Plusieurs autres appellations existent pour désigner un essai : traitement, combinaison, expérience, etc. [9].

3.9.2. Méthode des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponses (Response Surface Methodology, RSM) est un outil puissant pour l'optimisation et l'amélioration des processus industriels, permettant de comprendre les interactions complexes entre plusieurs variables et de trouver les conditions optimales pour les réponses désirées. Les plus importants plans de ce type sont :

- ☐ Plans composites
- ☐ Plans de Doehlert
- ☐ Plans de Box-Behnken

Dans notre processus de traitement thermique, les facteurs pourraient inclure la température, la durée et le type de refroidissement, tandis que la réponse pourrait être la dureté ou la résistance du matériau. En utilisant RSM, on pourrait déterminer les conditions optimales de traitement thermique qui maximisent la dureté du matériau tout en minimisant la déformation.

3.10. Plan de Box-Behnken

Le plan Box-Behnken est un type de plan expérimental utilisé dans la méthode des surfaces de réponses pour optimiser les processus avec trois facteurs ou plus. Conçu pour être efficace en termes de nombre d'expériences, il permet d'évaluer les interactions entre les variables avec un nombre réduit de tests par rapport aux plans factoriels complets. Le plan Box-Behnken ne comporte pas de points aux coins du cube expérimental, mais utilise plutôt des points situés au milieu des arêtes et au centre du cube (figure 3.13), garantissant ainsi une estimation robuste des effets principaux et des interactions quadratiques tout en minimisant le

nombre d'expériences nécessaires. Cela le rend particulièrement utile pour les études où les ressources expérimentales sont limitées.

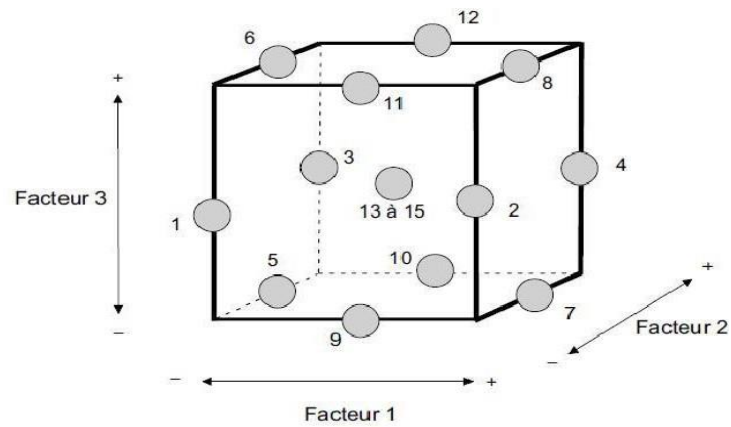


Figure 3.13. Points sur le diagramme représentent les essais expérimentaux effectués[10].

Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et discussion

4.1. Introduction

Le but de cette étude est de comparer l'évolution des propriétés des fils d'acier SAE 1008 traité par deux méthodes mécanique et thermique.

Dans un premier lieu une planification expérimentale du traitement thermique a été envisagée en appliquant le plan Box-Bhenken. En effet, trois paramètres ont été testés à savoir : le temps de maintien, le mode de refroidissement et la température.

Dans une deuxième partie l'évaluation des caractéristiques mécaniques et physiques des trois échantillons : acier brut, acier tréfilé au niveau de l'entreprise TREFAL et acier traité thermiquement au niveau de l'ENSTI-Annaba a été examinée.

Dans la dernière partie, des tests électrochimiques apportent d'intéressantes indications sur la vitesse de corrosion, le potentiel de corrosion ont été effectué.

4.2. Traitement thermique

Le traitement thermique a été effectué en appliquant la méthode de surface de réponse où on utilise le plan Box- Behnken. Pour cela, nous avons choisi trois facteurs a variés tels que : la température d'austénitisation (T_{aut}), le mode de refroidissement ainsi que la température de maintien (t_m).

Le tableau 4.1 représente les facteurs étudiés ainsi que leurs niveaux. Le logiciel utilisé pour le traitement statistique est le MINITAB 18.

Tableau 4.1. Facteurs et domaines étudiés.

	T_{aut} (°C)	Mode de refroidissement	t_m (min)
Minimum (-1)	800	air	20
Moyen (0)	900	eau	40
Maximum (+1)	1000	huile	60

Le plan BOX-BEHNKEN a été utilisé pour optimiser les meilleures conditions qui donnent un acier dur de microstructure bien déterminé et résiste à la corrosion. Les différents tests ont été effectués selon une matrice représentée dans le tableau 4.2.

4.2.1. Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto permet d'observer la valeur et l'importance d'un effet. Ce diagramme affiche la valeur absolue des effets de facteurs et trace une ligne de référence sur le graphique. D'après la figure 2.10, on constate que Tout effet qui s'étend au-delà de la ligne de référence peut être un effet important (*significatif*) [11]. Ces termes sont : le mode de refroidissement, $(\text{mode de refroidissement})^2$, $(T_{\text{aut}})^2$, $(t_m)^2$ et les interactions $T_{\text{aut}}*t_m$, mode de refroidissement* t_m .

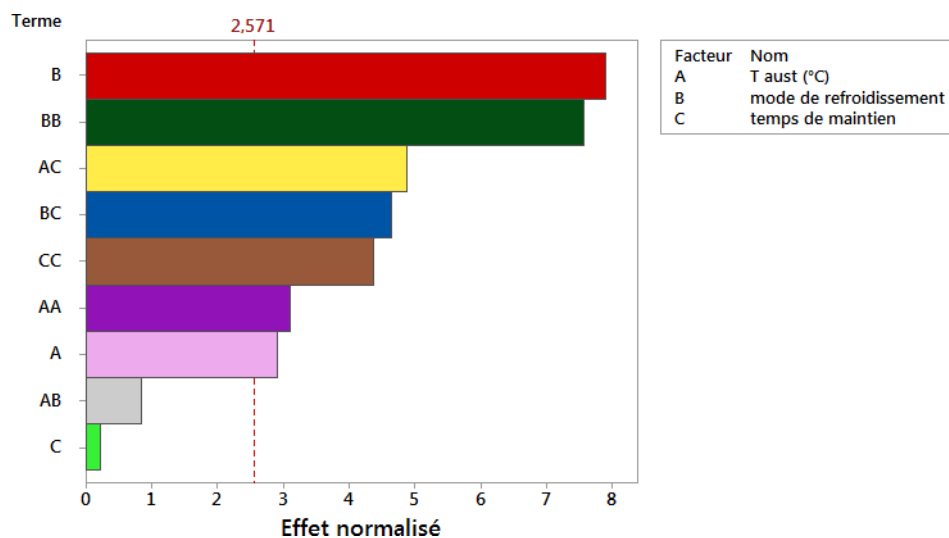


Figure 4.1. Diagramme de Pareto

Tableau 4.2. Matrice d'expérience des facteurs et des réponses selon le plan Box-Behnken

Essaie	T aust (°C)	Mode de refroidissement	Temps de maintien	Dureté expérimentale	Dureté théorique
1	900	Eau	40	47,66	47,00
2	900	Huile	60	71,33	75,12
3	800	Air	40	63,66	64,49
4	900	Air	20	55,00	51,21
5	900	Eau	40	50,00	47,00
6	800	Eau	20	54,00	56,96
7	900	Air	60	70,33	71,20
8	1000	Eau	20	67,00	68,71
9	800	Eau	60	79,66	77,95
10	900	Huile	20	94,66	93,79
11	1000	Air	40	50,33	52,41
12	1000	Huile	40	80,00	79,16
13	900	Eau	40	43,33	47,00
14	800	Huile	40	86,33	84,24
15	1000	Eau	60	52,00	49,04

4.2.2. Effets principaux

La figure 4.2 représente les effets principaux des facteurs étudiés. On observe une diminution de la dureté de l'acier SAE 1008 en fonction de tous les paramètres étudiés du niveau minimum au niveau moyen. En revanche, au-delà du niveau moyen, le mode de

refroidissement a un effet positif sur la dureté du substrat. En effet, la dureté passe de 45 HRC à 75 HRC.

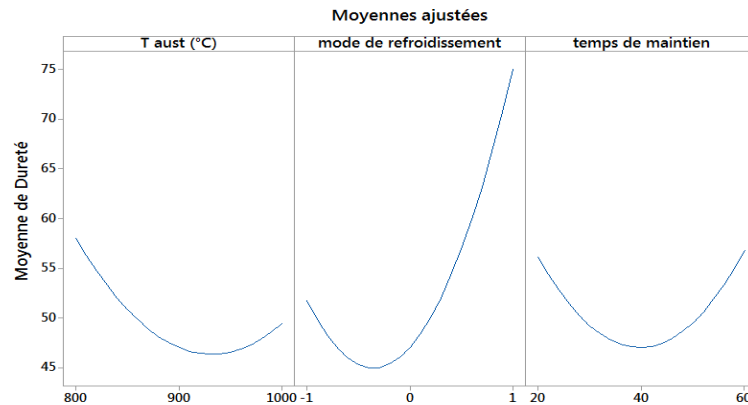


Figure 4.2. Effets principaux des facteurs étudiés sur la dureté de l'acier SAE 1008 traité thermiquement

De la figure 4.3, on constate six fortes interactions qui sont obtenus entre :

- A 800 °C de T.aust entre 20 et 40 min du temps de maintien.
- A 900 °C de T.aust entre 20 et 60 min du temps de maintien.
- A 1000 °C de T.aust entre 40 et 60 min de temps de maintien
- Au niveau minimum du mode de refroidissement (air) entre 20 et 40 min du temps de maintien.
- Au niveau moyen du mode de refroidissement (eau) entre 20 et 60 min du temps de maintien.
- Au niveau maximum du mode de refroidissement (huile) entre 40 et 60 min du temps de maintien.

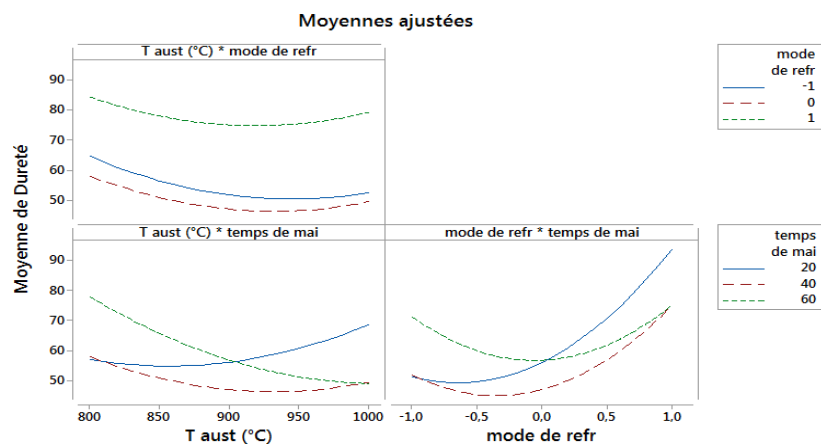


Figure 4.3. Effet d'interaction entre les facteurs étudiés

4.2.3. Modèle mathématique

Le modèle mathématique est de second ordre relie la dureté aux différents facteurs, de leurs

carrés et leur interaction.

La régression de la réponse en unités codées en fonction de tous les termes est représentée par l'équation 4.1.

$$\begin{aligned} Dureté = & 47 - 4,29 T_{aust} + 11,62 \text{ mode de ref.} + 0,33 t_m + 6,71 T_{aust} \times T_{aust} \\ & + 16,37 \text{ mode de ref.} \times \text{mode de ref.} + 9,46 t_m \times t_m + 1,75 T_{aust} \\ & \times \text{mode de ref.} - 10,16 T_{aust} \times t_m - 9,67 \text{ mode de ref.} \\ & \times t_m \end{aligned} \quad (eq. 4.1)$$

4.2.4. Surface de réponse

Les figures 4.4-4.6 représentent les surfaces de réponses et de contours du rendement de courant de l'électrodéposition de l'alliage Zn-Cu-Fe.

Le Minitab18 permis de tracé les surfaces de réponses et de contours en variant deux facteurs à la fois et en fixant le troisième à différents niveaux (min, moyen et max).

Et pour alléger le manuscrit, on présente quelques surfaces.

4.2.4.1. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs T_{aust} - mode de ref. et HDR

En fixant le temps de maintien à un niveau minimum (20 min), on constate que la valeur de la dureté la plus grande (>100) est obtenu au niveau haut de température et au mode de refroidissement. Cette constatation a été confirmée dans la surface de contours (voir la figure 4.4).

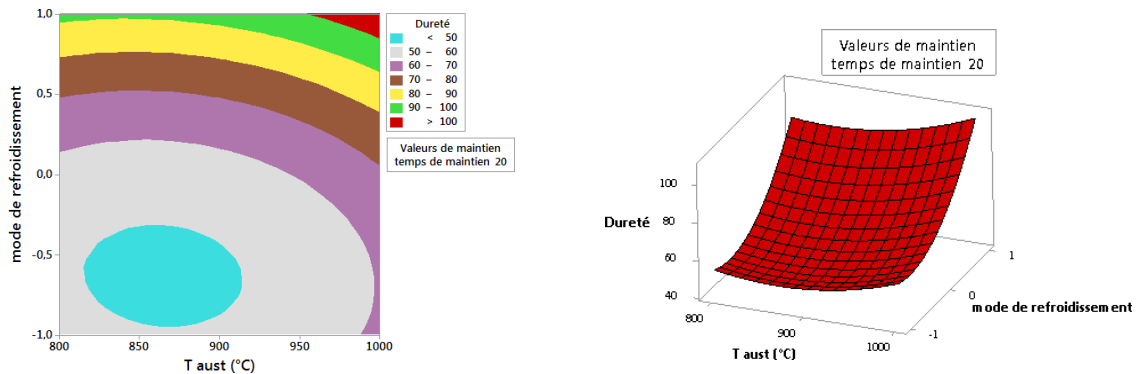


Figure 4.4. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de T_{aust} - mode de refroidissement à $t_m = 20$ min

4.2.4.2. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs T_{aust} - t_m . et HDR

En fixant le mode de refroidissement au niveau maximum (huile), on constate que la valeur de la dureté la plus grande (>100) est obtenu avec à la faible valeur du temps de maintien et entre 960°C et 100°C pour T_{aust} . Cette constatation a été confirmée dans la surface de réponse.

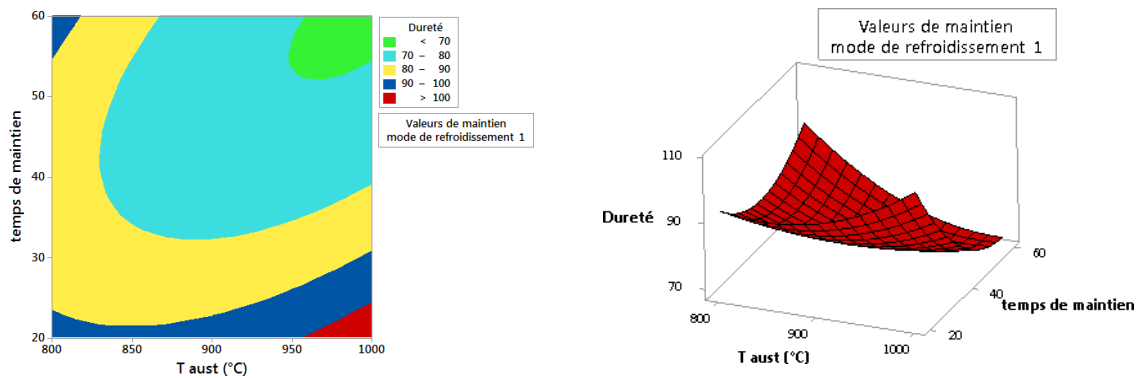


Figure 4.5. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de T_{aust} - t_m au niveau maximum pour le mode de refroidissement.

4.2.4.3. Surfaces de réponse et contours pour les facteurs t_m - mode de ref. et HDR

Au niveau maximum pour la température d'austénitisation ($T_{aust}=1000^{\circ}\text{C}$), la dureté de l'acier SAE 1008 dépasse les 100 HDR. Les bonnes valeurs sont indiquées par le contour rouge. Cette zone est située au niveau maximum pour le mode de refroidissement (huile) et au niveau minimum pour le temps de maintien.

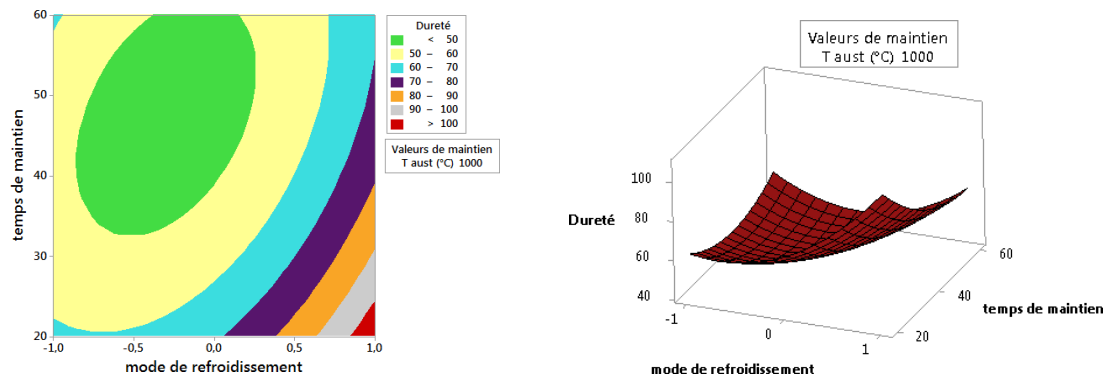


Figure 4.6. Surface de contours et de réponse de la dureté en fonction de t_m - mode de refroidissement à $T_{aust} = 1000^{\circ}\text{C}$

4.2.4.4. Optimisation

Après plusieurs optimisations la meilleure est donnée dans le tableau 4.3 Les résultats de l'optimisation indiquent les valeurs optimales pour chaque facteur et la valeur optimale de la dureté théorique.

Tableau 4.3. Résultats de critères d'optimisation

Paramètres	$T_{aust} (^{\circ}\text{C})$	Mode de ref.	tm (min)	Dureté	d
Opt.	1000	huile	20	108,12	1,00

Une vérification des conditions optimales a été réalisée trois fois dans les mêmes conditions expérimentales pour trouver une dureté expérimentale de l'ordre de **107,54 HDR**. Le modèle était donc suffisant pour représenter le processus.

4.3. Propriétés mécaniques et physique des différents échantillons

4.3.1. Essai de traction

La courbe contrainte-allongement ou contrainte déformation de l'acier SAE 1008 montre un comportement typique d'un matériau métallique.

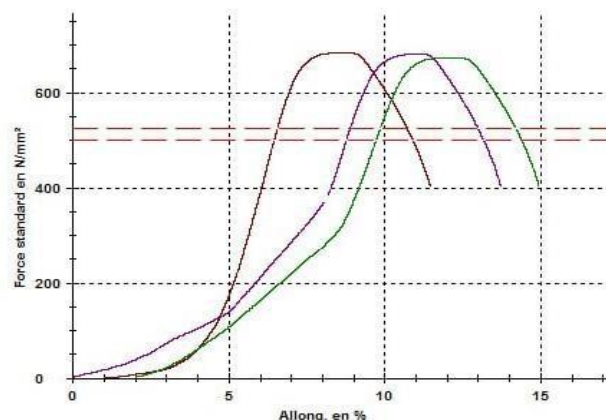


Figure 4.8. Courbe de traction de l'acier SAE1008

Initialement, nous observons une phase élastique linéaire où la contrainte augmente proportionnellement à l'allongement. Cela indique une bonne rigidité et élasticité du matériau.

Au-delà de la limite d'élasticité, le matériau commence à présenter une déformation permanente, ce qui suggère une certaine plasticité. La courbe devient non linéaire, ce qui peut être attribué à la migration des dislocations dans la structure cristalline.

La phase plastique se prolonge avec une augmentation progressive de la déformation sans une augmentation significative de la contrainte. Cela indique la capacité du matériau à subir une déformation importante avant la rupture, ce qui suggère une bonne ductilité. Finalement, le matériau atteint sa résistance ultime où la contrainte est maximale. Après ce point, la contrainte diminue brusquement jusqu'à la rupture complète du matériau. Il est important de noter que la contrainte de rupture est une mesure de la résistance du matériau à la rupture.

Tableau 4.4. Tableau des résultats de l'essai de traction

Fils	Diamètre Nominale mm	ReH N/mm ²	RmN/mm ²	s-Rupt%
Brut	6,00	274,12	414,12	50,90
Tréfilé	5,00	626,51	631,53	17,26
Traité thermiquement	6,00	685,00	925,00	12,85

4.3.2. Essai de résilience

L'essai de choc (résilience) sur une éprouvette d'acier de nuance SAE 1008 a été effectué. Il a été trouvé que l'énergie du pendule était de 50 J, et l'énergie absorbée par l'échantillon pendant l'essai Charpy U était de 36,05 J avec une défaillance partielle. Ces valeurs d'énergie

trouvées représentent la capacité de l'acier SAE 1008 à absorber l'énergie cinétique du pendule lors de l'impact.

4.3.3. Etude comparative

D'après les valeurs des essais de la dureté et la micro-dureté on constate que notre substrat (acier SAE 1008) a une forte résistance à la déformation plastique et à l'usure. Cette valeur a eu une augmentation d'un traitement à l'autre. En effet,

La mesure de densité nous indique que la densité de l'acier étudié est élevée. Elle augmente légèrement d'un mode de traitement à l'autre.

Etant donné que l'acier SAE 1008 est principalement constitué de fer, avec des ajouts d'éléments tels que le carbone, le manganèse, le silicium et le phosphore. Ces éléments permettent de renforcer les propriétés mécaniques de l'acier, notamment sa résistance et sa ductilité.

D'après les résultats trouvés (tableau 4.4), il a été constaté que l'acier SAE1008 est un matériau dense et solide, capable de supporter des charges importantes. C'est pourquoi il est largement utilisé dans la construction de structures. Sa densité élevée lui confère également une résistance élevée aux chocs et à l'usure, ce qui en fait un choix populaire dans les environnements soumis à des contraintes mécaniques élevées.

Tableau 4.5. Etude Comparative

Paramètres	Fil Brut	Fil Tréfilé	Fil traité thermiques
Traction (MPa)	414,74	631,53	925,00
Résilience J	36,05	49,88	49,89
Dureté Rockwell (HRC)	43,00	71,00	89,00
Micro-dureté Vickers (HV)	235,34	269,08	285,60
Ra (µm)	0,64	0,23	1,23
Densité (g/cm³)	7,872	7,907	8,104

D'après les images MEB représenté dans la figure 4.9, il a été constaté que le type traitement influe sur la structure de l'acier. En effet, la structure obtenue avec le traitement thermique est hétérogène, elle est composée essentiellement des cupules et des cônes. Cette forme trouvée est en accord avec les études de M Smati al [12] et A. Zinbi et al. [13].

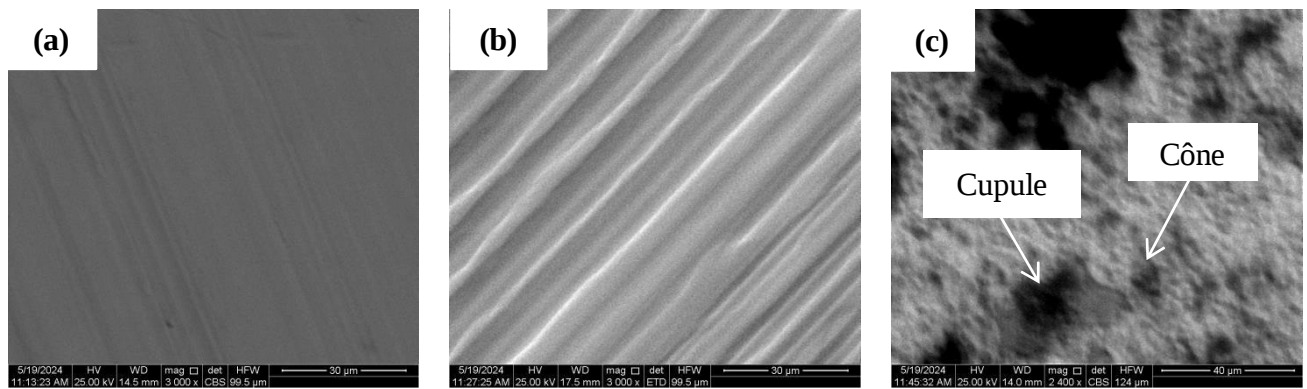


Figure 4.9. Microstructure de l'acier SAE 1008 Brut (a), Tréfilé (b) et traité thermiquement (c).

D'après les analyses EDS regroupées dans le tableau 4.6, il a été constaté que le pourcentage de fer augmente d'un traitement à l'autre, et c'est le traitement thermique qui donne le pourcentage le plus grand (95,14%). Ce résultat confirme

Tableau 4.6. Analyse EDS des différents échantillons de l'acier SAE 1008

Elément (%)	Brut	Tréfilé	Four
C	6,87	5,15	4,11
Si	0,62	0,57	0,12
Mn	0,59	0,79	0,63
Fe	91,92	93,49	95,14

4.4. Test électrochimique

4.4.1. Evolution du potentiel de circuit ouvert

Le potentiel de circuit ouvert de SAE 1008 immergé dans une solution de HCl à 1 M est mesuré pendant 30 minutes c'est-à-dire jusqu'à la stabilité de sa valeur.

La figure 4.10 illustre l'évolution du potentiel de circuit ouvert de SAE 1008 au cours de temps. Les courbes montrent que le traitement thermique déplace le potentiel du circuit ouvert vers les valeurs plus électropositives (anodiques), par contre le traitement par tréfilage déplace le potentiel du circuit ouvert vers les valeurs cathodiques.

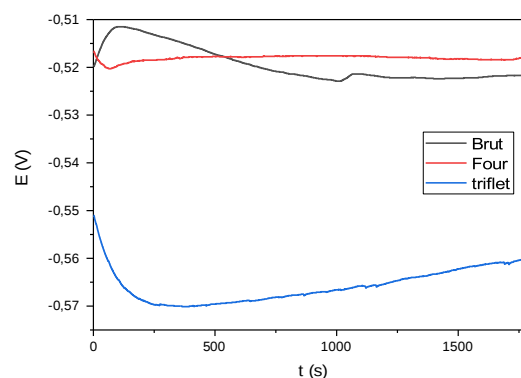


Figure 4.10. Évolution du potentiel de corrosion de SAE 1008 immergé pendant 30 min.

4.4.2. Courbes de polarisation

Pour évaluer la résistance à la corrosion de SEA 1008, des courbes de polarisation ont été enregistrées à une vitesse de balayage de 0,5 mV/s dans un milieu d'acide chlorhydrique 1M.

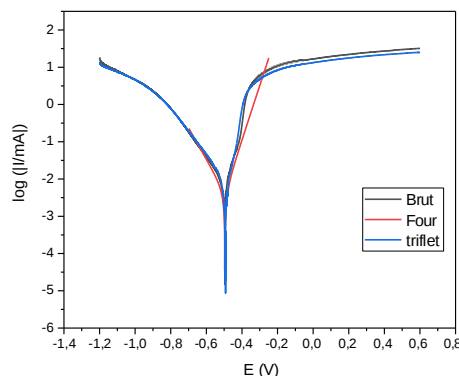


Figure 4.11. Courbes de polarisation pour les trois échantillons immergés dans une solution de HCl 1 M à 25°C.

D'après la figure 4.11, il a été remarqué une petite variation de potentiel de corrosion entre -494,068 mV (SEA 1008 tréfilé) à -9662 mV (traité thermiquement).

Le tableau 4.5 représente l'évolution de courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), vitesse de corrosion (V_{corr}) et la résistance à la polarisation (R_p) de SEA

Tableau 4.7. Paramètres électrochimiques des différents échantillons à partir de courbes Tafel.

Fil	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	V_{corr} (mpy)	R_p (Ohm)
Brut	-495,032	7,720	$1,267 \times 10^{-3}$	2 213
Traité thermiquement	-495,662	4,389	$7,204 \times 10^{-6}$	4 147
Tréfilé	-494,068	10,458	$1,716 \times 10^{-3}$	1 848

On constate que le résultat mentionné dans le tableau 1, le SEA 1008 suivie par le traitement thermique donne est le plus résistant à la corrosion par contre le traitement par tréfilage le rend moins résistant à la corrosion.

4.5. Conclusion

Après analyse des propriétés physiques et chimiques de l'acier SAE1008, il a été observé que ce matériau peut supporter des charges importantes tout en conservant une certaine élasticité avant rupture, et qu'il peut absorber l'énergie cinétique lors de l'impact, ce qui constitue un avantage remarquable. Les tests de dureté Brinell et Vickers ont révélé que l'acier SAE1008 a une dureté relativement élevée (43 HV et 235,34 HRC) et résiste à la déformation plastique.

Conclusion Générale

L'étude de l'évolution des propriétés mécanique et physique de l'acier SAE 1008 traité par deux méthodes mécanique et thermique nous a permis de constater le traitement thermique améliore les propriétés physique, chimique et mécanique de l'acier SAE 1008. En effet, d'un point de vue physique, l'acier SAE 1008 traités thermiquement présente une résistance à la traction élevée, ce qui signifie qu'il peut supporter des charges importantes sans se déformer de manière permanente. Sa limite d'élasticité est également satisfaisante, ce qui indique qu'il peut revenir à sa forme d'origine après avoir subi une déformation élastique. Ces caractéristiques mécaniques en font un matériau solide et fiable dans la construction et la fabrication de fils d'armature et de béton.

Sur le plan chimique, il présente une bonne résistance à la corrosion, ce qui est essentiel pour les applications de stockage où les matériaux sont exposés à des environnements corrosifs tels que l'eau ou les produits chimiques. Sa ténacité est également appréciable, ce qui signifie qu'il peut absorber l'énergie sans se rompre facilement. Cet aspect est crucial pour assurer la sécurité et la longévité des armatures et des fils de béton, souvent soumis à des chocs ou à des contraintes externes.

Il a été aussi constaté d'après les tests de dureté Brinell et Vickers que l'acier SAE1008 présente une dureté relativement élevée (43 HV et 235,34 HRC) et qu'il résiste à la déformation plastique.

A la fin, nous recommandons l'utilisation des plans d'expérience (DOE) à l'échelle industrielle pour optimiser les processus de traitement thermique de l'acier SAE 1008. Commencez par identifier clairement les propriétés critiques à améliorer, telles que la dureté et la ductilité, et les facteurs influents comme la température, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement. Choisissez le type de plan d'expérience adapté, comme un plan factoriel complet ou fractionnaire, pour étudier les interactions entre ces facteurs. Réalisez les expériences de manière rigoureuse en répétant et randomisant les essais pour garantir des résultats fiables.

Références bibliographique

- [1] Imene ABDYOU et Ouarda FARHAT, « étude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés del'ENICAB-Biskra ». Mohammed Khider-Biskra. 2020
- [2] <https://trefal.dz/>
- [3] SIMONNET, G., tréfilage de l'acier M645, In Traité des matériaux métalliques, techniques de l'ingénieur, 1996
- [4] J. Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse. 1999.
- [5] S. Karam, Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt. University of Limoges 2004.
- [6] T. Silou, M. Malanda, L. Loubaki, Optimisation de l'extraction de l'huile essentielle de Cymbopogon citratus grâce à un plan factoriel complet 23. Journal of food engineering 2004, 65 (2), 219-223.
- [7] S. Touzouirt, C. Limani, F. Oukaci, T. Ahmed Zaïd, M. Nabiev, Optimisation de la stabilité d'une émulsion de Pickering H/E à l'aide de la méthodologie des surfaces de réponses.
- [8] The Canadian Journal of Chemical Engineering 2017, 95 (1), 77-82.
- [9] F. Bendebane, F. Etude des effets de solvants organiques sur l'extraction du Naphtalène de la phase fuel en utilisant différents plans d'expériences. Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2013.
- [10] J. Goupy, L. Creighton, introduction aux plans d'expériences, 3 ème édition, 2001-2006
- [11] A. KAMOUN, M.M. CHAABOUNI, H.F. AYET., *Plans d'expériences de traitement de surface, méthodologie des surfaces de réponses (MSR), technique de l'ingénieur*, doc M 1429, (2011).
- [12] : M Smati, M Nasri, Marhabi Driss, Iost Alain, Influence d'une eau fortement salée sur la propagation de fissure par fatigue de l'acier inoxydable 17 -4 pH, Conference: 20th Congrès Français de Mécanique, 2011 Besançon France.
- [13] A. Zinbi, A. Bouchou, M. Caliez, C. Gontier et N. Rigollet, Etude du comportement thermomécanique et de la transformation martensitique de AISI 301 écroui, conférence papier 2019.