

UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA

Faculty of Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering



Master's Thesis

ACADEMIC MASTER

Field: Science and Technology

Program: Mechanical Engineering

Specialization: Mechanical manufacturing and production

Presented by:

DEHMANI Souhayb

GHEZZOUL Med Larbi

Thesis Title:

**Experimental study of the effect of burnishing on
the surface quality and corrosion resistance of
AISI 1045 steel**

Soutenu publiquement le : 07/06/2026

Devant le jury :

BELLOUFI Abderrahim	Pr	Président	UKM Ouargla
REZGUI Imane	Pr	Examineur	UKM Ouargla
ABDELKRIM Mourad	Pr	Encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2025 /2026

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Présenté Par :

Dehmani Souhayb

Ghezzoul Med Larbi

Thème

**Étude expérimentale de l'effet du brunissage sur
la qualité de surface et la résistance à la corrosion
de l'acier AISI 1045**

Soutenu publiquement le :07/06 /2026

Devant le jury :

BELLOUFI Abderrahim	Pr	Président	UKM Ouargla
REZGUI Imane	Pr	Examineur	UKM Ouargla
ABDELKRIM Mourad	Pr	Encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2025 /2026

Dédicace

Nous tenons à dédier ce modeste travail :

À nos parents.

À nos frères,

À nos sœurs,

À nos familles,

À tous nos amis et nos collègues.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le dieu nos créateur.

*Nous tenons à exprimer toute nos gratitude et reconnaissance à notre encadreur **Pr. Mourad Abdelkrim** qui d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens qui permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons aussi à remercier **BELLOUFI Abderrahim** pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il n'a fait en présidant le jury.*

*Nos remerciements vont également à **REZGUI Imane** pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu n'honorer de leur présence dans ce jury.*

*Enfin, à tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études, et à tous les enseignants de l'université **KASDI MERBAH de l'OUARGLA**.*

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I	1
Introduction.....	3
I.1 Présentation de l'acier AISI 1045	3
I.2. Applications industrielles de l'acier au carbone 1045.....	4
I.3. Usinage de l'AISI 1045.....	5
I.3.1. Procédé de tournage.....	6
I.3.2. Procédé de brunissage.....	6
I.3.2.1. Définition du brunissage	6
I.3.2.2. Types de processus de brunissage.....	7
a) Brunissage à bille.....	7
b) Brunissage à rouleaux.....	8
I.4. Les paramètres influençant le processus de brunissage	9
I.4.1. Force de brunissage.....	9
I.4.2. Diamètre et type d'outil	9
I.4.3. Lubrification	9
I.4.4. Vitesse de rotation.....	9
I.4.5 Nature du matériau usiné	9
I.4.6. Avance	10
I. 4.7. Profondeur de pénétration.....	10
I.4.8. Nombre de passes	10
I.5. Facteurs influençant la qualité de surface	10
I.5.1. Rugosité	10
I.5.2. Ondulation.....	10
I.5.3. Direction des traces d'outil	10
I.5.4. Défauts de surface	11
I.6. Effets du brunissage.....	11
I.6.1. Effets sur la qualité géométrique de surface	11
I.6.2. Effets sur la qualité physique de surface	11
I.6.3. Effets sur la qualité mécanique de surface.....	12
I.7. Avantages et inconvénients des outils de brunissage	12
I.7.1. Avantages	12
I.7.2. Inconvénients.....	13
I.8. Propriétés mécaniques de surface	13
I.8.1. Dureté	14
I.8.2. Contraintes résiduelles.....	14

I.8.3. Résistance à l'usure	15
I.8.4. Résistance à la corrosion	15
I.9. Définition de la corrosion.....	16
I.9.1. Méthode par perte de masse	16
I.9.2. Méthodes électrochimiques.....	17
I.10.Bilan de la littérature : Avancées majeures et verrous scientifiques identifiés.....	17
I.11.1.Analyse critique et positionnement de la présente étude	22
Conclusion	23
Chapitre II.....	24
Introduction.....	24
II.1. Matériau Utilisé : Acier AISI 1045	24
II.1.1. Présentation et spécifications	24
II.2. Propriétés chimiques, physiques et mécaniques de l'acier AISI 1045	24
II.2.1. Composition chimique.....	24
II.2.2. Propriétés physiques.....	25
II.2.3. Propriétés mécaniques.....	25
II.2.4. Dimensions et géométrie des échantillons utilisé	26
II.3. Équipements et Outils Utilisés	26
II.3.1. Machine-outil : Tour mécanique.....	26
II.3.2. Outil de brunissage	27
II.4. Méthode de Taguchi	28
II.4.1. Principe de la méthode	28
II.4.2. Facteurs et niveaux étudiés	29
II.5.Définition de Minitab	29
II.5.1.Application de la méthode Taguchi avec Minitab	29
II.5.2.Étapes de la méthode Taguchi avec Minitab	30
II.5.3. Tableau orthogonal L27 avec résultats et rapports S/N.....	31
II.5.4 Analyse par la Méthode de Taguchi — Plan L27	32
II.5.4.1 Analyse de l'influence des facteurs sur la Dureté (H).....	32
II.5.4.2 Analyse de l'influence des facteurs sur la Rugosité (Ra)	33
II.6. Procédure Expérimentale du Brunissage	34
II.6.1. Préparation des éprouvettes.....	34
II.7. Méthodes de Caractérisation de la Surface	35
II.7.1. Mesure de la rugosité de surface Ra	35
II.7.1.1. Définition du paramètre Ra.....	35
II.7.1.2. Appareil de mesure	35

II.7.2. Mesure de la dureté H(HL)	35
II.7.2.1. Principe de la dureté	35
II.7.2.2. Appareil de mesure	35
II.8. Essai de Corrosion par Perte de Masse	37
II.8.1. Principe de la méthode	37
II.8.2. Procédure opératoire des essais de corrosion par méthode de perte de masse	37
2. Application du vernis	38
3. Mesure des dimensions et pesée initiale	39
4. Préparation de la solution corrosive	39
Calcul de la quantité de NaCl	39
5. Immersion	40
6. Après immersion	40
7. Pesée finale	40
8. Calcul de la perte de masse	41
9. Détermination du taux de corrosion	43
Conclusion	45
Introduction	46
III.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité Ra	46
III.1.1. Graphique des rapports Signal/Bruit (S/N) pour Ra	46
III.2. Analyse des effets principaux sur la dureté superficielle H(HL)	47
III.2.1. Graphique des rapports Signal/Bruit (S/N) pour H	47
III.3. Analyse des résultats de corrosion	49
III.3.1. Histogramme du taux de corrosion τ	49
III.3.2. Carte de icorr	49
Conclusion	51
Conclusion Générale	53
Références bibliographiques	53

Listes des figures

<i>Figure I.1 Barre en acier au carbone AISI 1045</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.2 Engrenages et pignons</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3 Bagues.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.4 accouplements.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.5 Composants de direction et tirages</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.6 Tour conventionnel semi-automatique.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.7 base de fonctionnement du brunissage.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.8 Outil de brunissage à bille. (A) Schéma général. (B) Vue latérale de l'outil de brunissage fixé par une pièce d'adaptation.</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.9 Outils de brunissage et brunissage par rouleaux : (a) du congé d'un arbre étagé pour induire des contraintes résiduelles de compression en surface et améliorer ainsi sa durée de vie en fatigue ; (b) d'une surface conique ; et (c) d'une surface plane</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.10 Schéma de la composition des couches superficielles.</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.11 : Principe de la méthode de mesure de la corrosion par perte de masse</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.12 : Potentiostat utilisé pour les essais électrochimiques.</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.1 : L'échantillon utilisé dans les essais expérimentaux</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.2 : Tour semi-automatique.</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.3: Outil de brunissage.</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.4: Opération de brunissage.</i>	<i>34</i>
<i>Figure II.5: rugosimètre à contact.</i>	<i>35</i>
<i>Figure II.6: Testeur de dureté Leeb portable</i>	<i>36</i>
<i>Figure II.7: Technique de perte de masse</i>	<i>37</i>
<i>Figure II.8 : Préparation de l'échantillon par ponçage.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.9 : Application d'une couche de vernis sur l'échantillon.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.10 : Balance analytique utilisée pour la mesure de la masse des échantillons</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.1. : Influence des facteurs principaux (N, f, ap) sur le rapport signal/bruit de la rugosité de surface R_a</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.2. : Influence des facteurs principaux (vc, f, ap) sur le rapport signal/bruit de la dureté de surface H</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.3. : Histogramme du taux de corrosion (t) pour les 9 essais.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.4. : Évolution de la densité de courant de corrosion (i_{corr}) pour les 9 essais ..</i>	<i>50</i>

Listes des tableaux

<i>Tableau I.1. Composition chimique de l'acier AISI 1045.</i>	<i>24</i>
<i>Tableau I.2. Propriétés physiques de l'acier AISI 1045.</i>	<i>25</i>
<i>Tableau I.3. Propriétés mécaniques de l'acier AISI 1045.</i>	<i>25</i>
<i>Tableau II.1 : Facteurs et niveaux étudiés</i>	<i>29</i>
<i>Tableau II.2 : Plan d'expériences L27</i>	<i>29</i>
<i>Tableau II.3 : Plan d'expériences L27 avec résultats de rapports S/N</i>	<i>31</i>
<i>Tableau II.4 : les paramètres appropriés à utiliser dans notre expérience</i>	<i>33</i>
<i>Tableau II.5 : Résultats des mesures de dureté H(HL) et de rugosité Ra après brunissage</i>	<i>36</i>
<i>Tableau II.6. : Résultats de surface.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau II.7: Caractéristiques de la solution corrosive</i>	<i>40</i>
<i>Tableau II.8 : Résultats des essais de corrosion par perte de masse (9 essais)</i>	<i>41</i>
<i>Tableau II.9 : Résultats des essais de corrosion par perte de masse spécifique (9 essais) ...</i>	<i>42</i>
<i>Tableau II.10. : Résultats du taux de corrosion τ pour les 9 essais</i>	<i>43</i>
<i>Tableau II.11 : Paramètres utilisés pour le calcul de (i_{CORR})</i>	<i>44</i>

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
<i>Ra</i>	μm	Rugosité moyenne de surface (rugosité arithmétique)
<i>H (HL)</i>	HL	Dureté Leeb (mesurée par rebond dynamique)
<i>HV</i>	—	Dureté Vickers
<i>HB</i>	—	Dureté Brinell
<i>N</i>	tr/min	Vitesse de rotation de la broche
<i>f</i>	mm/tr	Avance de l'outil
<i>ap</i>	mm	Profondeur de pénétration
<i>vc</i>	tr/min	Vitesse de coupe
<i>S/N</i>	dB	Rapport Signal/Bruit (méthode Taguchi)
<i>m₁</i>	g	Masse initiale de l'échantillon
<i>m₂</i>	g	Masse finale de l'échantillon
<i>Δm</i>	g	Perte de masse ($m_1 - m_2$)
<i>S</i>	cm ²	Surface exposée à la corrosion
<i>R</i>	mm	Rayon de l'échantillon cylindrique
<i>h</i>	mm	Hauteur de l'échantillon cylindrique
<i>τ</i>	g/cm ² .an	Taux de corrosion
<i>i_t^{orr}</i>	μA/cm ²	Densité de courant de corrosion
<i>n</i>	—	Nombre d'électrons échangés ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} = 2$)
<i>F</i>	C/mol	Constante de Faraday (96 485 C/mol)
<i>M</i>	g/mol	Masse molaire du fer (55,85 g/mol)
<i>t</i>	s (ou jours)	Durée d'immersion

Introduction générale

Introduction générale

Les procédés mécaniques sont fondamentaux dans l'industrie, car ils constituent une méthode plus rapide et plus efficace pour façonner des pièces métalliques et obtenir des dimensions de haute précision. Les industries de pointe telles que l'aérospatiale, l'automobile et le médical exigent un état de surface et une résistance à la corrosion exceptionnels, faisant de l'amélioration des surfaces un objectif de recherche constant.

Cependant, l'usinage de surface seul ne garantit pas des résultats optimaux. Il peut entraîner des dommages superficiels sur les pièces les plus exposées au frottement, aux contraintes mécaniques et thermiques, et même à des impacts mineurs comme l'usure. Parmi les différentes techniques d'amélioration de surface, le brunissage apparaît comme une solution prometteuse grâce à sa capacité à réduire la rugosité, augmenter la dureté superficielle et générer des contraintes résiduelles compressives [1]. Ces modifications de l'intégrité de surface sont susceptibles d'influencer favorablement le comportement du matériau vis-à-vis de la corrosion. Toutefois, malgré les nombreux travaux consacrés à l'amélioration des propriétés mécaniques par brunissage, l'impact réel de ce procédé sur la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045 demeure insuffisamment étudiée et nécessite une évaluation expérimentale approfondie.

Dans ce contexte, plusieurs questions se posent : dans quelle mesure le brunissage peut-il améliorer la qualité de surface de l'acier AISI 1045 ? Les modifications induites par ce procédé sont-elles capables de réduire la vitesse de corrosion du matériau ? Existe-t-il une relation entre la rugosité de surface obtenue après brunissage et la résistance à la corrosion ? Enfin, quelles sont les conditions opératoires permettant d'optimiser simultanément les propriétés de surface et le comportement à la corrosion ?

Afin de répondre à ces interrogations, ce travail propose d'étudier l'influence du brunissage sur la rugosité de surface et sur la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045. L'évaluation de la corrosion sera réalisée par la méthode gravimétrique de perte de masse dans une solution saline, permettant ainsi de quantifier l'efficacité du brunissage comme procédé d'amélioration de la durabilité des composants mécaniques.

Ce mémoire est organisé en deux parties principales. La première partie est consacrée à l'étude bibliographique et présente les notions fondamentales relatives à l'acier AISI 1045, au phénomène de corrosion et au procédé de brunissage. Elle décrit également les matériaux utilisés, les méthodes expérimentales et les techniques de caractérisation adoptées.

La deuxième partie présente les résultats expérimentaux obtenus concernant la rugosité, la dureté et la résistance à la corrosion après brunissage. Une analyse de l'influence des paramètres opératoires ainsi qu'une optimisation par la méthode de Taguchi sont également réalisées. Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre I

État de l'art sur le procédé de brunissage à bille

Introduction

Ce chapitre présente le cadre théorique sur lequel repose l'ensemble de la recherche. Il commence par définir le matériau étudié, l'acier mi-dur AISI 1045, en détaillant sa composition chimique, ses propriétés physiques et mécaniques, ainsi que ses nombreuses applications industrielles. Il aborde ensuite les techniques d'usinage associées, en se concentrant sur le tournage comme étape préparatoire au brunissage.

Le chapitre traite ensuite du brunissage à billes : il le définit, en présente les différents types, les outils et les paramètres influents, avant d'examiner ses divers effets sur la qualité géométrique, physique et mécanique de la surface. Enfin, une synthèse critique de la littérature scientifique actuelle sur ce sujet est présentée.

I.1 Présentation de l'acier AISI 1045

L'acier AISI 1045 est un acier au carbone de construction appartenant à la catégorie des aciers à teneur moyenne en carbone (Medium Carbon Steel), conformément aux normes de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) et de l'AISI (American Iron and Steel Institute). [2].

Il est largement utilisé dans la fabrication de composants mécaniques soumis à des charges moyennes, tels que les arbres, les engrenages et les bielles, ce qui en fait un matériau essentiel dans les industries mécaniques et de fabrication des équipements. La Figure suivant présente l'éprouvette cylindrique en acier AISI 1045 utilisée dans cette étude.



Figure I.1 Barre en acier au carbone AISI 1045

I.2. Applications industrielles de l'acier au carbone 1045

Les figures suivantes présentent une collection d'applications industrielles de l'acier au carbone AISI 1045 dans divers secteurs. On y retrouve notamment des composants mécaniques tels que les engrenages, les bagues, les accouplements et les composants de direction.



Figure I.2 Engrenages et pignons [3]

Engrenages et pignons : Éléments mécaniques utilisés pour transmettre le mouvement et le couple entre les arbres.



Figure I.3 Bagues [3]

Bagues : Pièces de guidage servant à réduire le frottement et à améliorer la stabilité des assemblages.



Figure I.4 accouplements [4]

Accouplements : Dispositifs permettant de relier deux arbres et de transmettre la puissance mécanique.



Figure I.5 Composants de direction et tirages[5]

Composants de direction et tirages : Éléments assurant la transmission des mouvements et des efforts dans les systèmes de direction.

I.3. Usinage de l'AISI 1045

Lors de l'usinage de l'acier AISI 1045 (fraisage, tournage ou perçage), les propriétés de surface de la pièce sont fortement influencées par les paramètres de coupe. La rugosité n'est pas qu'un simple critère esthétique ; elle reflète la capacité de la pièce à résister aux contraintes mécaniques appliquées pendant l'usinage. Une surface excessivement rugueuse fragilise la pièce en provoquant des fissures sous charges cycliques, en accélérant l'usure par contact et en la rendant plus sensible à la corrosion. [6]

Face à ces enjeux, le brunissage s'impose comme une solution de finition particulièrement pertinente. Cette opération, qui agit par déformation plastique superficielle, ne se contente pas d'abaisser la rugosité : elle densifie la couche externe du matériau, ce qui se traduit par une dureté de surface accrue et, en retour, par une meilleure tenue à l'usure et à la corrosion.

I.3.1. Procédé de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière, dédié à la réalisation de pièces de révolution. Il met en jeu deux mouvements conjugués : la rotation de la pièce autour de son axe, assurée par la broche, et le déplacement rectiligne de l'outil porté par le chariot, générant ainsi les surfaces souhaitées. [7]



Figure I.6 Tour conventionnel semi-automatique

I.3.2. Procédé de brunissage

I.3.2.1. Définition du brunissage

Le brunissage est un procédé mécanique de finition de surface à froid qui consiste à améliorer l'état de surface et à augmenter la dureté superficielle d'une pièce métallique par l'application d'une pression contrôlée au moyen d'un outil de brunissage. Ce procédé repose sur la déformation plastique de la couche superficielle, sans enlèvement de matière, et peut être appliqué à différents types de géométries, notamment les surfaces cylindriques, les arbres, les alésages ainsi que les surfaces planes. [8]

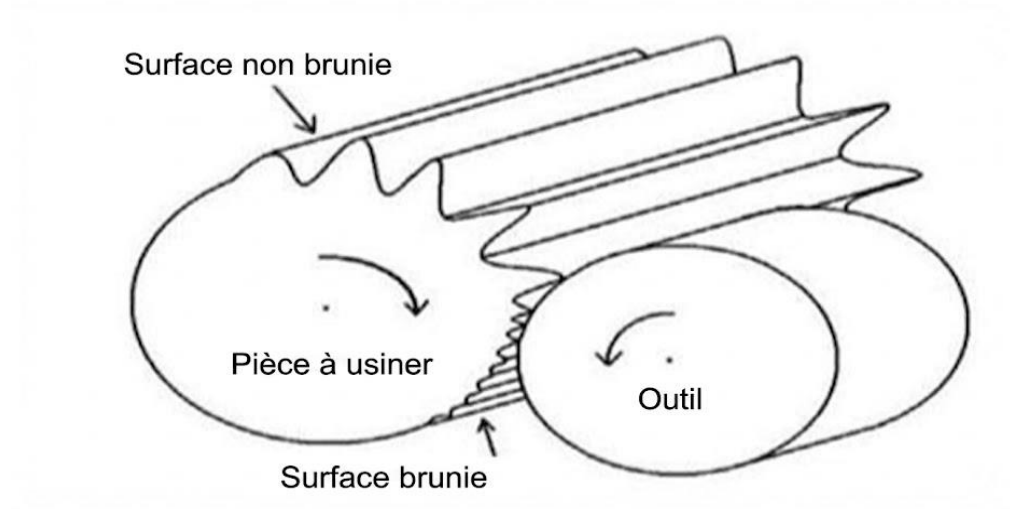


Figure I.7 base de fonctionnement du brunissage [8]

I.3.2.2. Types de processus de brunissage

a) Brunissage à bille

Le brunissage à la bille est un procédé de finition de surface qui consiste à faire rouler une bille pleine sur la surface d'une pièce métallique. Lors de ce procédé, la bille appuie sur les arêtes de la surface, lissant ainsi le matériau et créant de fines rainures sans enlever de matière. Ce procédé réduit la rugosité, augmente la dureté de surface et renforce les contraintes résiduelles de compression, améliorant ainsi la résistance à l'usure et prolongeant la durée de vie de la pièce. [8]

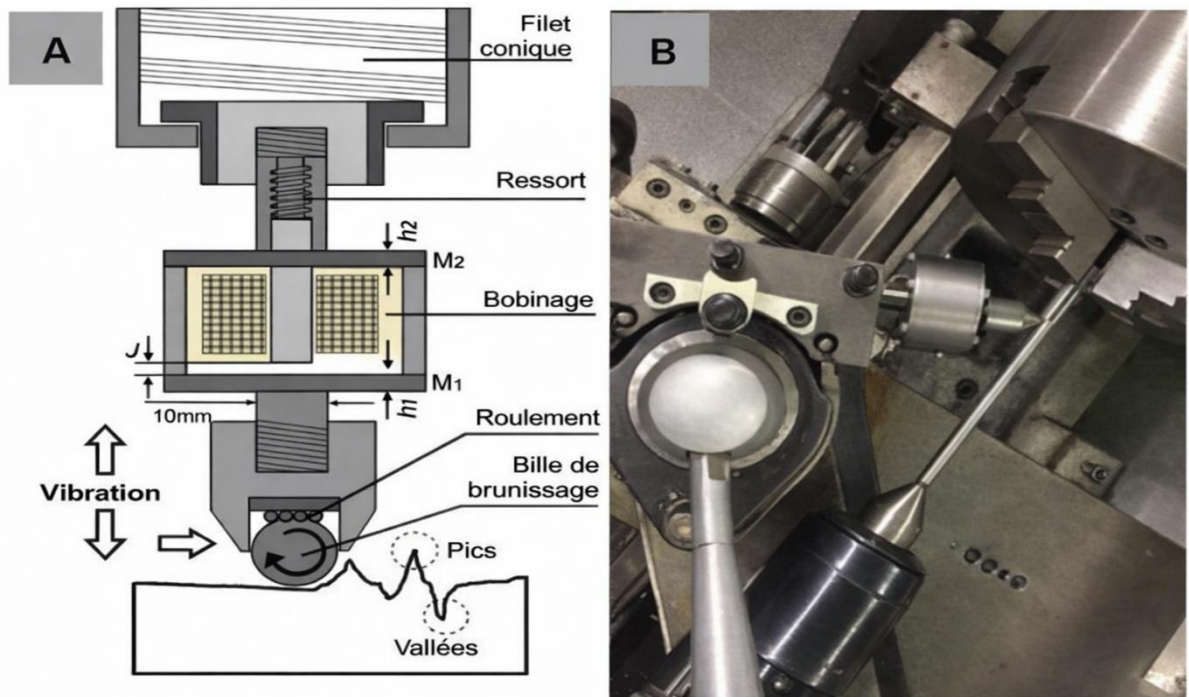


Figure I.8 Outil de brunissage à bille. (A) Schéma général. (B) Vue latérale de l'outil de brunissage fixé par une pièce d'adaptation.

b) Brunissage à rouleaux

Brunissage par rouleau, repose sur un rouleau solide et poli qui passe sur la surface de la pièce afin de corriger les micro-irrégularités. Le mouvement de roulage exerce une pression sur le métal en surface, améliorant ainsi la finesse du fini, tout en générant des contraintes de compression bénéfiques qui augmentent la résistance de la pièce aux sollicitations mécaniques, à l'usure et à la corrosion chimique. Ce procédé se distingue par son efficacité sur les surfaces planes, cylindriques et coniques. [8]

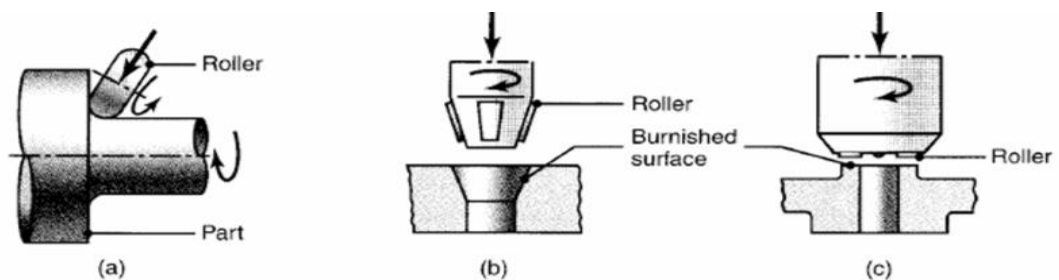


Figure I.9 Outils de brunissage et brunissage par rouleaux : (a) du congé d'un arbre étagé pour induire des contraintes résiduelles de compression en surface et améliorer ainsi sa durée de vie en fatigue ; (b) d'une surface conique ; et (c) d'une surface plane .

I.4. Les paramètres influençant le processus de brunissage

La qualité de surface obtenue après le processus de brunissage dépend de plusieurs paramètres opératoires, chacun jouant un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques et superficielles de la pièce. Les principaux paramètres sont les suivants : [9]

I.4.1. Force de brunissage

La force de brunissage figure parmi les paramètres les plus influents sur la qualité de surface. En effet, le degré de déformation plastique induit dans la couche superficielle est directement proportionnel à la force appliquée. Les études ont montré qu'une augmentation de cette force améliore la dureté superficielle et réduit la rugosité, bien qu'au-delà d'un certain seuil, elle puisse entraîner une dégradation de la surface. [10]

I.4.2. Diamètre et type d'outil

Le diamètre et le type d'outil jouent un rôle important dans la nature de la déformation induite. La littérature indique qu'un diamètre plus grand assure une meilleure répartition de la force sur la surface. Par ailleurs, chaque type d'outil présente des applications spécifiques : la bille est adaptée aux surfaces cylindriques, tandis que le rouleau convient mieux aux surfaces planes. [10]

I.4.3. Lubrification

La lubrification contribue à améliorer les conditions du brunissage en réduisant le frottement à l'interface outil-pièce. Les études montrent que le choix d'un lubrifiant approprié améliore la qualité de surface et prolonge la durée de vie de l'outil. [10]

I.4.4. Vitesse de rotation

La vitesse de rotation agit sur la durée de contact entre l'outil et la surface. Les recherches indiquent que des vitesses modérées permettent d'obtenir une déformation plastique plus homogène, tout en soulignant que l'influence de ce paramètre demeure généralement moins significative que celle de la force et de l'avance. [38]

I.4.5 Nature du matériau usiné

La réponse des matériaux au brunissage varie en fonction de leurs propriétés mécaniques. Les recherches indiquent que les matériaux à forte ductilité répondent mieux à la déformation plastique, tandis que les matériaux plus durs nécessitent des forces de brunissage plus élevées pour obtenir les mêmes résultats. [11]

I.4.6. Avance

L'avance est considérée comme l'un des paramètres déterminants dans le contrôle de la rugosité de surface. La littérature montre qu'une faible avance favorise une meilleure couverture de la surface et renforce l'effet de lissage, tandis qu'une avance élevée entraîne une détérioration notable de la qualité de surface. [12]

I. 4.7. Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration détermine le niveau de déformation plastique imposé à la surface. Les études indiquent qu'une augmentation de cette profondeur améliore la dureté superficielle et réduit la rugosité, tout en soulignant la nécessité d'éviter les valeurs excessives susceptibles d'endommager la surface. [13]

I.4.8. Nombre de passes

Le nombre de passes constitue un facteur influent sur la qualité du fini final. Les recherches révèlent que l'amélioration est la plus marquée lors des premières passes, puis décroît progressivement jusqu'à atteindre un plateau au-delà duquel des passes supplémentaires n'apportent plus de bénéfice. [14]

I.5. Facteurs influençant la qualité de surface**I.5.1. Rugosité**

Elle correspond aux irrégularités fines et rapprochées présentes à la surface, généralement sous forme de marques d'avance laissées par l'outil de coupe lors de l'usinage. La rugosité est caractérisée par la hauteur ou la profondeur moyenne de ces irrégularités, mesurée sur une longueur d'échantillonnage relativement courte. [15]

I.5.2. Ondulation

Elle regroupe les irrégularités de surface dont l'espacement est supérieur à la longueur d'échantillonnage de la rugosité (environ 1 mm). Ces ondulations sont souvent causées par des vibrations, des phénomènes de broutement (chatter), ou encore par des déflexions de l'outil et de la pièce sous l'effet des efforts de coupe et de la température. [15]

I.5.3. Direction des traces d'outil

Elle désigne l'orientation dominante des irrégularités de surface. Cette direction est généralement définie par rapport à une arête de référence de la pièce. Elle dépend de la

configuration de la pièce et de l'outil sur la machine, ainsi que du type de mouvement relatif entre eux. [15]

I.5.4. Défauts de surface

Les défauts de surface désignent les imperfections localisées qui perturbent la continuité ou l'homogénéité de la surface. Ils peuvent être d'origine intrinsèque au matériau, tels que les inclusions, les fissures ou les soufflures qui se révèlent lors de l'usinage, ou bien résulter directement du processus d'usinage lui-même. [15]

I.6. Effets du brunissage

Le brunissage est un procédé de traitement mécanique de surface qui provoque une déformation plastique des couches superficielles du matériau. Cette action entraîne simultanément un lissage du profil microgéométrique et un durcissement par écrouissage, ce qui améliore considérablement les propriétés mécaniques et technologiques des pièces métalliques. [16]

I.6.1. Effets sur la qualité géométrique de surface

Lors de l'opération de brunissage, les aspérités présentes sur la surface sont plastiquement déformées : les crêtes sont écrasées et redistribuées dans les creux. Ce phénomène conduit à une surface plus homogène et à une réduction significative de la rugosité.

L'amélioration de l'état de surface dépend fortement des paramètres du procédé tels que la vitesse, l'avance, l'effort appliqué, le rayon de l'outil et le nombre de passes. En général, des faibles avances combinées à des vitesses élevées permettent d'obtenir les meilleures qualités de surface, alors que des avances trop importantes dégradent la rugosité. [16]

I.6.2. Effets sur la qualité physique de surface

Le brunissage induit un phénomène d'écrouissage dans les couches superficielles, ce qui conduit à une augmentation de la microdureté. Cette évolution dépend du matériau ainsi que des conditions opératoires (vitesse, avance, température et effort).

De manière générale, l'augmentation de la déformation plastique améliore la dureté superficielle, mais certains paramètres comme une vitesse ou une avance trop élevée peuvent entraîner une diminution de cet effet. [16]

I.6.3. Effets sur la qualité mécanique de surface

Le brunissage introduit des contraintes résiduelles de compression dans la couche superficielle du matériau. Ces contraintes sont bénéfiques car elles améliorent le comportement mécanique, notamment la résistance à la fatigue, à l'usure et à la rupture.

La présence de ces contraintes compressives réduit la propagation des fissures en surface, ce qui augmente la durée de vie des pièces. De plus, l'amélioration de la rugosité et de la dureté contribue également à une meilleure tenue en fatigue, étant donné que les fissures s'initient généralement à la surface du matériau. [16]

I.7. Avantages et inconvénients des outils de brunissage

Les outils de brunissage présentent de nombreux avantages qui ont favorisé leur large utilisation dans l'amélioration de la qualité des surfaces dans les applications industrielles, bien qu'ils comportent également certaines limites. Les principaux avantages et inconvénients peuvent être résumés comme suit : [17]

I.7.1. Avantages

- Obtention d'une excellente qualité de surface, avec une rugosité très faible comprise entre 1 et 3 μm .
- Amélioration de la résistance à l'usure et à la corrosion, contribuant à prolonger la durée de vie des pièces mécaniques.
- Accroissement de la durée de vie de l'outil grâce à l'utilisation de matériaux avancés tels que les carbures.
- Amélioration de l'efficacité de production grâce à l'utilisation d'outils à grande vitesse et de technologies avancées.
- Augmentation de la précision des opérations via des systèmes de contrôle avancés, garantissant des résultats stables et reproductibles.
- Réduction de l'impact environnemental grâce à l'utilisation de lubrifiants écologiques et de procédés propres.

- Support de la maintenance prédictive à l'aide de systèmes de surveillance et de diagnostic en temps réel. [17]

I.7.2. Inconvénients

- Applicabilité limitée des outils, nécessitant une adaptation spécifique en fonction du matériau et des conditions de fonctionnement.
- Taux de production parfois inférieur à celui d'autres procédés d'usinage.
- Coût initial élevé des outils avancés et des systèmes automatisés.
- Usure des outils lors d'un fonctionnement prolongé à grande vitesse.
- Complexité des systèmes de contrôle nécessitant une expertise technique pour le réglage et la maintenance.
- Besoin d'investissements supplémentaires pour la mise en œuvre des systèmes de surveillance et de diagnostic.
- Performance parfois inférieure de certains lubrifiants écologiques par rapport aux lubrifiants traditionnels dans certaines applications.

Ainsi, le recours aux techniques de brunissage nécessite une évaluation équilibrée entre leurs avantages techniques et leurs contraintes opérationnelles, en fonction des exigences de l'application industrielle et des conditions d'exploitation. [17]

I.8. Propriétés mécaniques de surface

Le brunissage est un procédé de finition mécanique qui améliore significativement les propriétés mécaniques de la couche superficielle des matériaux. Par déformation plastique, il induit un écrouissage, modifie l'état de contraintes et améliore le comportement tribologique et chimique des surfaces. Ces effets concernent principalement la dureté, les contraintes résiduelles, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion

Comme illustré dans la figure I.11, la surface d'un matériau métallique est constituée de plusieurs couches distinctes : une fine couche d'oxydes et d'éléments adsorbés (< 10 nm), suivie d'une couche affectée thermiquement et mécaniquement (1–500 μ m), avant d'atteindre le

matériau de référence. Ces couches peuvent présenter des caractéristiques mécaniques différentes de celles du matériau de base en raison des transformations microstructurales induites par les procédés de fabrication ou de traitement de surface.

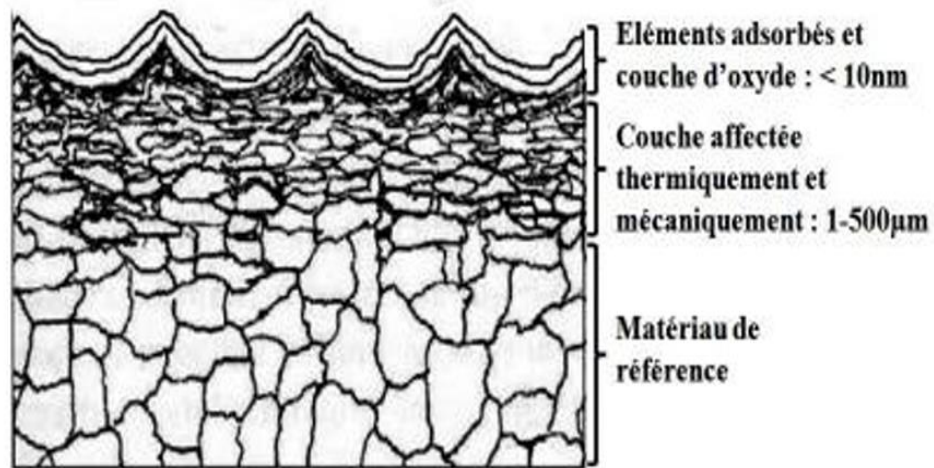


Figure.I.11 Schéma de la composition des couches superficielles.

I.8.1. Dureté

La dureté d'un matériau exprime sa capacité à résister à la pénétration de sa surface par un outil dur, comme une bille en acier trempé dans l'essai Brinell ou une pyramide en diamant dans l'essai Vickers. Si le matériau oppose une forte résistance à cette pénétration, il est considéré comme dur ; dans le cas contraire, il est dit mou. La dureté se mesure à l'aide de différentes échelles, qui varient selon la nature du matériau et le type d'essai utilisé. [18]

I.8.2. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes internes qui subsistent dans un matériau en l'absence de toute sollicitation extérieure. Dans le cas des matériaux métalliques usinés, elles apparaissent principalement à la suite des déformations plastiques hétérogènes engendrées par les opérations de coupe ou de traitement mécanique de surface.

Le brunissage génère des contraintes résiduelles de compression dans la couche superficielle du matériau. Ces contraintes résultent de la déformation plastique imposée par l'outil, suivie d'un retour élastique des couches sous-jacentes. Leur amplitude dépend directement des

paramètres opératoires tels que la force de brunissage, la vitesse d'avance et le nombre de passes.

Les contraintes résiduelles compressives sont particulièrement bénéfiques, car elles limitent l'initiation et la propagation des fissures en surface, améliorant ainsi la résistance à la fatigue et augmentant la durée de vie des composants mécaniques. À l'inverse, les contraintes résiduelles de traction, induites par certains procédés d'usinage conventionnels, ont tendance à fragiliser la surface et à favoriser l'amorçage de l'endommagement sous chargement cyclique. [19]

I.8.3. Résistance à l'usure

L'amélioration de la résistance à l'usure après brunissage est principalement liée à la combinaison de deux effets complémentaires : l'augmentation de la dureté superficielle par écrouissage et la réduction de la rugosité de surface.

Une surface plus lisse réduit les frottements et limite les mécanismes d'usure abrasive et adhésive. Par ailleurs, le durcissement superficiel induit par le brunissage renforce la capacité de la surface à résister aux sollicitations mécaniques répétées. Des études ont montré que le brunissage peut améliorer la résistance à l'usure jusqu'à 52 % par rapport à une surface simplement tournée, ce qui en fait une technique particulièrement efficace pour les composants soumis à des conditions tribologiques sévères. [20]

I.8.4. Résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion d'un matériau est fortement influencée par l'état de sa surface. Le brunissage améliore cette résistance à travers plusieurs mécanismes complémentaires : la réduction de la rugosité diminue la surface de contact avec le milieu corrosif et limite les sites d'amorçage de la corrosion, tandis que les contraintes résiduelles compressives induites réduisent la perméabilité de la couche superficielle aux agents agressifs.

Des travaux expérimentaux ont confirmé que le brunissage améliore de manière significative la résistance à la corrosion des aciers. Les mesures électrochimiques ont montré une réduction notable de la densité de courant de corrosion après traitement, ainsi qu'une amélioration de la dureté de surface, et une réduction de la rugosité. [21]

I.9. Définition de la corrosion

La corrosion désigne la dégradation progressive d'un métal résultant de son interaction chimique ou électrochimique avec le milieu qui l'entoure. Elle se distingue des autres formes d'altération — telles que l'érosion ou le grippage — qui relèvent de mécanismes purement physiques et non de réactions avec l'environnement. [22]

I.9.1. Méthode par perte de masse

Cette technique expérimentale repose sur le suivi quantitatif de la dégradation matérielle d'un échantillon soumis à un environnement agressif.

Le principe est relativement simple : des éprouvettes de section connue (S) sont immergées dans une solution corrosive dont les conditions thermiques restent fixes tout au long de l'expérience. À l'issue d'une durée d'exposition prédéfinie, chaque échantillon est récupéré, puis pesé de nouveau. La grandeur exploitée est l'écart de masse entre l'état initial (m_1) et l'état final (m_2).

Cette différence ($m_1 - m_2$) reflète directement la quantité de matière dissoute ou arrachée sous l'effet de la corrosion, et permet ainsi de caractériser l'intensité du phénomène en fonction des paramètres expérimentaux choisis. [14]

Alors on obtient : $\Delta m = (m_1 - m_2) \dots\dots\dots (I.1)$

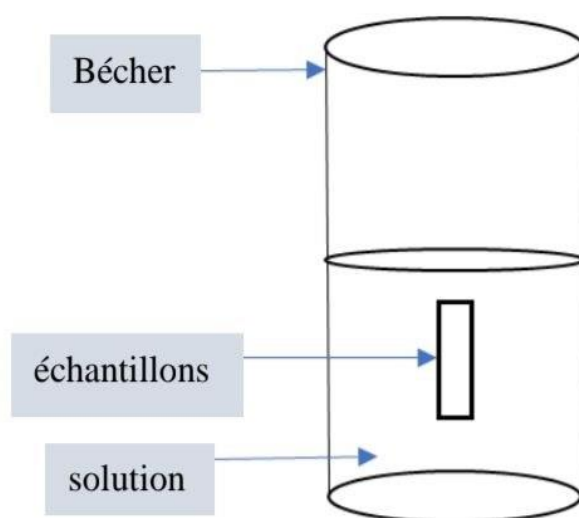


Figure I.12 : Principe de la méthode de mesure de la corrosion par perte de masse

I.9.2. Méthodes électrochimiques

Les techniques électrochimiques offrent une approche plus approfondie, car elles reposent sur l'étude directe du processus électrochimique à l'origine de la corrosion. De plus, leur caractère quantitatif, notamment à travers l'exploitation des courbes de polarisation obtenues à vitesse de balayage modérée, permet une analyse plus précise du comportement corrosif du matériau. [23]



Figure I.13 : Potentiostat utilisé pour les essais électrochimiques. [24]

I.10. Bilan de la littérature : Avancées majeures et verrous scientifiques identifiés.

Étude N° 01 : Influence du brunissage à bille sur la rugosité, la dureté et la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045 [25]

Objectif : Étudier l'influence des principaux paramètres du brunissage à bille (force, avance, vitesse) sur la rugosité moyenne R_a et la dureté de surface d'éprouvettes cylindriques en acier AISI 1045, puis évaluer l'effet du brunissage sur la résistance à la corrosion.

Méthodologie : Conception expérimentale factorielle 3^3 couplée à la Méthode de Surface de Réponse (RSM). La polarisation de Tafel et la Spectroscopie d'Impédance Électrochimique (EIS) ont été utilisées pour quantifier la résistance à la corrosion dans une solution NaCl à 3,5 %. La diffraction des rayons X (DRX) a permis d'évaluer les changements de phase.

Principaux résultats : La rugosité Ra a été réduite de 3,51 μm à 0,61 μm (réduction de 83 %). La dureté Brinell est passée de 202 HB à 236 HB (amélioration de 14 %). La densité de courant de corrosion a chuté de 13,99 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ à 1,15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. La force de brunissage et l'avance sont les paramètres les plus influents sur Ra.

Lacunes identifiées : Absence d'analyse microstructurale (MEB) de la couche écrouie. Pas d'essais de corrosion à long terme. Plages de force limitées ; effet de la vitesse non exploré en dehors des plages testées.

Étude N° 02 : Effet du brunissage par glissement sur la résistance à la corrosion et la rugosité de surface des aciers à haute résistance [26]

Objectif : Déterminer l'influence de la force du brunissage par glissement (slide burnishing) sur les indicateurs de rugosité (Ra, Rz, Rt, Rv et Rp) et sur la résistance à la corrosion de plusieurs nuances d'aciers à haute résistance mécanique (TRIP-440Y, DP-330Y, HSLA-SP780).

Méthodologie : Tests expérimentaux réalisés à des forces de brunissage comprises entre 30 et 450 N, avec une trajectoire d'outil en zigzag et un recouvrement de 50 % de la largeur de l'empreinte. Les essais de corrosion ont été conduits par polarisation électrochimique dans une solution NaCl.

Principaux résultats : La force optimale pour minimiser la rugosité est de 60 N pour l'acier HSLA-SP780, 150 N pour le DP-330Y et 180 N pour le TRIP-440Y. Le brunissage a amélioré la résistance à la corrosion pour toutes les nuances testées, confirmant les résultats obtenus sur l'AISI 1045.

Lacunes identifiées : Aciers AHSS différents de l'AISI 1045 : résultats non directement transposables. Pas d'évaluation par EIS. Absence de mesure des contraintes résiduelles.

Étude N° 03 : Étude comparative des caractéristiques de surface de l'AISI 304 et de l'AISI 1045 après tournage combiné au brunissage à bille [27]

Objectif : Comparer l'effet des paramètres du brunissage à bille (profondeur de pénétration, vitesse de broche, nombre de passes) sur la rugosité, la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045 et de l'acier inoxydable AISI 304.

Méthodologie : Conception expérimentale avec variation de l'avance (0,12 mm/tr), vitesse (160 tr/min), profondeur de pénétration (0,025 à 0,085 mm) et nombre de passes (1 à 4). La résistance à la corrosion a été évaluée par polarisation potentiodynamique.

Principaux résultats : Pour l'AISI 1045 : réduction maximale de Ra de 79,3 %, amélioration de la dureté de 22 %, diminution du taux d'usure spécifique de 49,3 %. La combinaison avance 0,12 mm/tr, vitesse 160 tr/min, profondeur 0,025 mm, 4 passes a donné la rugosité minimale.

Lacunes identifiées : Pas de plan d'optimisation multi-objectifs intégré. Absence de caractérisation EIS complète. L'effet des contraintes résiduelles sur la corrosion n'est pas analysé.

Étude N° 04 : Influence du laminage profond sur l'intégrité de surface de l'acier AISI 1045 recuit [28]

Objectif : Évaluer l'effet des paramètres du laminage profond (deep rolling) — pression (4 à 14 MPa) et vitesse d'avance (0,04 à 0,16 mm/tr) — sur l'intégrité de surface de l'acier AISI 1045 recuit, incluant la rugosité, la résistance à la corrosion et la durée de vie en fatigue.

Méthodologie : Laminage profond sur tour CNC avec variation de pression hydraulique et d'avance. Caractérisation par profilométrie, essais électrochimiques (EIS et polarisation de Tafel dans NaCl), essais de fatigue en flexion rotative et analyse microstructurale par microscopie.

Principaux résultats : Le laminage profond a significativement réduit la rugosité Ra, surtout à 14 MPa. Cependant, les essais électrochimiques n'ont montré aucune amélioration directe de la résistance à la corrosion. La durée de vie en fatigue après exposition corrosive a été nettement améliorée.

Lacunes identifiées : Procédé de laminage profond différent du brunissage à bille : conclusions non directement applicables. Absence d'optimisation par RSM. Mécanismes de protection contre la corrosion non élucidés.

Étude N° 05 : Influence du brunissage à bille à faible plasticité sur la résistance à la fatigue à grand nombre de cycles de l'acier AISI 1045 [29]

Objectif : Analyser l'effet du brunissage à bille à faible plasticité (Low-Plasticity Burnishing — LPB) sur la résistance à la fatigue à grand nombre de cycles (HCF) de l'acier AISI 1045, et quantifier la contribution des contraintes résiduelles compressives et de l'écrouissage superficiel.

Méthodologie : Éprouvettes cylindriques en AISI 1045 brunissées par LPB, puis soumises à des essais de fatigue en flexion rotative. Les contraintes résiduelles ont été mesurées par diffraction des rayons X (DRX). La rugosité et la microdureté ont été caractérisées avant et après brunissage.

Principaux résultats : Le brunissage LPB a entraîné une réduction considérable de la rugosité, une augmentation de la microdureté et une élévation de la limite d'endurance en fatigue. Les contraintes résiduelles compressives constituent le principal mécanisme d'amélioration de la résistance à la fatigue.

Lacunes identifiées : Absence d'évaluation de la résistance à la corrosion électrochimique. Étude limitée à la fatigue HCF. Pas d'optimisation des paramètres par plan d'expériences.

Étude N° 06 : Caractérisation expérimentale de l'effet du brunissage sur la rugosité, la microdureté, l'intégrité de surface et la durée de vie en fatigue de l'AISI 1045 [30]

Objectif : Étudier systématiquement l'effet des paramètres du brunissage (force, avance, vitesse, nombre de passes) sur la rugosité de surface, la microdureté, l'intégrité de surface et la durée de vie en fatigue de l'AISI 1045 à l'aide d'un plan d'expériences factoriel complet.

Méthodologie : Plan d'expériences factoriel complet avec mesure de Ra, microdureté Vickers (HV), analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) et essais de fatigue. Les paramètres étudiés comprennent la force de brunissage, l'avance et la vitesse de rotation.

Principaux résultats : Amélioration significative de toutes les propriétés de surface après brunissage. La force de brunissage est le paramètre le plus influent sur la microdureté, tandis que l'avance et la vitesse contrôlent principalement la rugosité. La durée de vie en fatigue est nettement augmentée.

Lacunes identifiées : Pas de mesure de la résistance à la corrosion. Absence d'optimisation par RSM ou méthodes modernes. Conditions opératoires peu adaptées à l'usinage CNC actuel.

Étude N° 07 : Étude expérimentale du brunissage ultrasonique assisté : effet sur la rugosité et la dureté de l'AISI 1045 et de l'alliage d'aluminium 6061 [31]

Objectif : Étudier l'influence de la vibration ultrasonique, de la vitesse d'avance et du nombre de passes sur la rugosité de surface et la dureté lors du brunissage à bille, et comparer les performances du brunissage ultrasonique assisté (UAB) avec le brunissage conventionnel.

Méthodologie : Plan d'expériences factoriel complet. Deux procédés comparés : brunissage conventionnel et brunissage assisté par vibrations ultrasoniques (UAB). Les indicateurs mesurés sont la rugosité Ra et la dureté Vickers HV. L'analyse statistique a permis d'identifier les paramètres les plus influents.

Principaux résultats : Le brunissage ultrasonique assisté améliore davantage la dureté de surface et la profondeur d'écrouissage, tout en réduisant plus efficacement la rugosité Ra. La combinaison du chargement statique et dynamique crée une déformation plastique plus intense, favorable aux contraintes compressives.

Lacunes identifiées : Procédé ultrasonique coûteux et peu industrialisé. Absence d'évaluation de la résistance à la corrosion. Les résultats sur Al 6061 ne sont pas directement applicables à l'AISI 1045.

Étude N° 08 : Modélisation expérimentale et optimisation de la qualité de surface et de la consommation énergétique lors du brunissage au rouleau de l'acier AISI 1045 par des modèles intelligents (PSO-ANN) [32]

Objectif : Prédire et optimiser simultanément la rugosité de surface Ra et la consommation d'énergie lors du brunissage au rouleau (roller burnishing) de l'acier AISI 1045, en utilisant la méthode RSM et un modèle hybride PSO-ANN (Particle Swarm Optimization – Artificial Neural Network).

Méthodologie : Brunissage au rouleau sur tour CNC avec variation de la force F, de la vitesse de broche N et de l'avance f. Modélisation par RSM et réseau de neurones artificiels optimisé par PSO. Validation croisée des modèles prédictifs sur des jeux de données indépendants.

Principaux résultats : La force de brunissage F est le paramètre le plus influent sur R_a (contribution : 50,9 %), tandis que la vitesse N domine la consommation d'énergie (92,37 %). Le modèle PSO-ANN présente une précision élevée ($R^2 = 0,9911$ pour R_a et $R^2 = 0,9987$ pour la puissance).

Lacunes identifiées : Absence d'évaluation de la résistance à la corrosion. Modèle PSO-ANN spécifique aux conditions testées, peu généralisable. Pas d'analyse des contraintes résiduelles ni de caractérisation de l'intégrité de surface.

I.11.1. Analyse critique et positionnement de la présente étude

L'analyse de la littérature met en évidence plusieurs tendances convergentes concernant l'effet du brunissage sur l'acier AISI 1045 :

Par rapport aux travaux existants, la présente étude se distingue par une approche expérimentale intégrée permettant d'évaluer conjointement et de manière systématique l'effet des paramètres du brunissage (force, avance, vitesse) sur la rugosité de surface R_a , la dureté superficielle HV, et la résistance à la corrosion (caractérisée par EIS et polarisation de Tafel dans une solution NaCl à 3,5 %) de l'acier AISI 1045. La combinaison de ces trois indicateurs de performance dans un plan d'expériences structuré constitue l'originalité principale de cette contribution .

Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons pu établir une base théorique solide qui constitue le socle de notre travail expérimental. La présentation des caractéristiques de l'acier AISI 1045 a mis en évidence l'intérêt de ce matériau dans les applications industrielles, notamment grâce à ses propriétés mécaniques équilibrées qui en font un choix pertinent pour les études d'usinage et de traitement de surface.

Dans ce sens, le brunissage se présente comme une solution mécanique efficace et économique. Les différents éléments abordés, qu'il s'agisse des types d'outils, des paramètres du procédé ou de ses effets sur la rugosité, la dureté et les contraintes résiduelles, montrent que cette technique offre un réel potentiel d'amélioration des propriétés de surface sans enlèvement de matière supplémentaire.

Ces acquis théoriques serviront de référence directe pour l'interprétation des résultats expérimentaux présentés dans les chapitres suivants, où l'influence des paramètres du brunissage sur les propriétés de surface de l'acier AISI 1045 sera étudiée et analysée.

Chapitre II

Matériaux et Méthodes Expérimentales

Introduction

Ce chapitre décrit l'ensemble des matériaux, équipements et protocoles expérimentaux mis en œuvre dans le cadre de cette étude. L'objectif est d'évaluer l'influence des paramètres du brunissage sur la qualité de surface et la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045. La méthodologie adoptée repose sur la méthode de Taguchi (tableau orthogonal L27) associée à des mesures de dureté, de rugosité et à un essai de corrosion par perte de masse.

II.1. Matériau Utilisé : Acier AISI 1045

II.1.1. Présentation et spécifications

L'acier AISI 1045 est un acier à teneur moyenne en carbone, appartenant à la catégorie des aciers de construction. Il est largement utilisé dans la fabrication de composants mécaniques soumis à des charges modérées (arbres, engrenages, bielles). Son choix dans cette étude est justifié par sa disponibilité industrielle et sa sensibilité aux traitements mécaniques de surface.

II.2. Propriétés chimiques, physiques et mécaniques de l'acier AISI 1045

Les principales caractéristiques de l'acier AISI 1045 seront présentées à travers des tableaux structurés regroupant la composition chimique, les propriétés physiques et les propriétés mécaniques, afin de fournir une description quantitative précise et globale de ce matériau. [33]

II.2.1. Composition chimique

Tableau I.1. Composition chimique de l'acier AISI 1045. [33]

Elément	Teneur
Carbone, C	0.420 - 0.50 %
Fer, Fe	98.51 – 98.98 %
Manganèse, Mn	0.60 – 0.90 %
Phosphore, Ph	≤0.040 %

Soufre, S	$\leq 0.050 \%$
-----------	-----------------

II.2.2. Propriétés physiques

Tableau I.2. Propriétés physiques de l'acier AISI 1045. [33]

Propriétés physiques	Système métrique	Système impérial
Densité	7.87 g/cm ³	0.284 lb/in ³

II.2.3. Propriétés mécaniques

Tableau I.3. Propriétés mécaniques de l'acier AISI 1045. [33]

Propriétés mécaniques	valeur
Dureté Brinell	163
Dureté Knoop (convertie à partir de la dureté Brinell)	184
Dureté Rockwell B (convertie à partir de la dureté Brinell)	84
Dureté Vickers (convertie à partir de la dureté Brinell)	170
Résistance à la traction ultime	565 MPa
Résistance à la traction à la limite d'élasticité	310 MPa
Allongement à la rupture (sur 50 mm)	16.0 %
Réduction de section	40.0 %
Module d'élasticité (typique pour l'acier)	200 GPa

Module d'élasticité volumique (typique pour l'acier)	140 GPa
Coefficient de Poisson (typique pour l'acier)	0.290
Module de cisaillement (typique pour l'acier)	80 GPa

II.2.4. Dimensions et géométrie des échantillons utilisé

Les échantillons ont été façonnés en cylindres sur un tour. Cela a facilité leur utilisation et leur préparation lors des essais expérimentaux.



Figure II.1 : L'échantillon utilisé dans les essais expérimentaux

II.3. Équipements et Outils Utilisés

II.3.1. Machine-outil : Tour mécanique

L'usinage des échantillons a été réalisé sur un tour mécanique de marque EMCO MAIER, modèle Maximat V13, d'origine autrichienne, disponible au niveau de l'atelier de l'université. figure II.2.



Figure II.2 : Tour semi-automatique.

II.3.2. Outil de brunissage

L'outil de brunissage utilisé dans cette étude est de type à bille :

Les billes de précision en acier dur sont des éléments sphériques métalliques utilisés dans diverses applications industrielles et commerciales nécessitant une haute précision et une grande fiabilité. Elles sont fabriquées à partir d'acier de haute qualité, généralement de l'acier chromé ou inoxydable, avec des tolérances très strictes garantissant une uniformité dimensionnelle et géométrique.

Diamètre : 24 mm



Figure.II,3: Outil de brunissage.

II.4. Méthode de Taguchi

II.4.1. Principe de la méthode

La méthode Taguchi est une approche statistique d'optimisation des paramètres de procédé. Elle repose sur l'utilisation de tableaux orthogonaux, ce qui réduit considérablement le nombre d'essais tout en conservant une analyse statistique fiable de l'influence des facteurs sur la réponse étudiée [34].

Le rapport signal/bruit (S/N) est utilisé comme critère d'optimisation.

Pour obtenir une dureté maximale (H(HL)), le critère « plus grand est meilleur » est appliqué,

défini comme suit : $S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\sum \frac{1}{Y^2}}{n} \right)$ [db]..... **(II.1)**

Pour obtenir une qualité de surface optimale, le critère « plus petit est meilleur » est appliqué,

défini comme suit : $S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\sum Y^2}{n} \right)$ [db]..... **(II.2)**

II.4.2. Facteurs et niveaux étudiés

Trois paramètres de brunissage ont été identifiés comme facteurs influents, chacun variant sur trois niveaux :

Tableau II.1 : Facteurs et niveaux étudiés

Facteur	Symbole	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Unité
Vitesse de rotation	N	440	900	1500	tr/min
Avance	F	0.045	0.157	0.225	mm/tr
Profondeur de pénétration	Ap	0.1	0.2	0.3	mm

II.5.Définition de Minitab

Minitab est un logiciel statistique largement utilisé pour l'analyse de données, le contrôle qualité et la conception d'expériences. Il permet l'application de méthodes statistiques avancées, telles que la méthode Taguchi, afin d'optimiser les paramètres de processus et d'améliorer la qualité des produits. [35]

II.5.1.Application de la méthode Taguchi avec Minitab

Les données expérimentales issues des essais de brunissage réalisés précédemment ont été utilisées pour effectuer une analyse d'optimisation par la méthode de Taguchi. Cette approche statistique vise à évaluer l'influence des paramètres de coupe sur les réponses étudiées, notamment la rugosité de surface (Ra) et la dureté (HB), et à déterminer la combinaison optimale des paramètres permettant d'améliorer simultanément la qualité de surface et les propriétés mécaniques du matériau.

Tableau II.2 : Plan d'expériences L27 [8] ,[18]

essais	ap	F	N	H	Ra
1	0.100	0.045	440	381	1.422
2	0.100	0.045	900	432	0.652
3	0.100	0.045	1500	424	0.371
4	0.100	0.157	440	620	1.853
5	0.100	0.157	900	649	0.939
6	0.100	0.157	1500	604	0.906

7	0.100	0.225	440	657	0.596
8	0.100	0.225	900	648	0.494
9	0.100	0.225	1500	663	0.488
10	0.200	0.045	440	647	0.353
11	0.200	0.045	900	661	0.400
12	0.200	0.045	1500	646	0.499
13	0.200	0.157	440	647	0.509
14	0.200	0.157	900	666	0.664
15	0.200	0.157	1500	650	1.030
16	0.200	0.225	440	648	1.286
17	0.200	0.225	900	652	1.072
18	0.200	0.225	1500	641	1.001
19	0.300	0.045	440	676	0.240
20	0.300	0.045	900	628	0.307
21	0.300	0.045	1500	643	0.267
22	0.300	0.157	440	645	0.409
23	0.300	0.157	900	650	0.422
24	0.300	0.157	1500	669	0.481
25	0.300	0.225	440	634	0.396
26	0.300	0.225	900	649	0.433
27	0.300	0.225	1500	704	0.457

II.5.2.Étapes de la méthode Taguchi avec Minitab

1. Ouvrir le logiciel Minitab.
2. Aller dans : Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design.
3. Choisir le type de plan L27 pour 3 facteurs à 3 niveaux .
4. Définir le nombre de facteurs et leurs niveaux.
5. Cliquer sur OK pour générer le plan d'expériences.
6. Saisir les résultats expérimentaux (Ra, H, etc.) dans les colonnes.
7. Aller dans : Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design.
8. Sélectionner la réponse (Ra ou H).
9. Choisir le type de rapport S/N :

- Préférer plus petit pour Ra.
 - Préférer plus grand pour H.
10. Cliquer sur OK pour afficher les résultats.
11. Utilisez l'option de tri (Données > Trier) pour classer les valeurs du rapport signal/bruit (S/N) de la plus élevée à la plus faible.
12. Sélectionnez les meilleures expériences en fonction des valeurs de S/N.
13. Choisissez :
- Les 3 meilleures configurations qui atteignent simultanément la dureté la plus élevée et la meilleure qualité de surface.
 - Les 3 meilleures configurations qui atteignent uniquement la dureté la plus élevée.
 - Les 3 meilleures configurations qui atteignent uniquement la meilleure qualité de surface.
14. Analysez le diagramme des effets principaux.
15. Déterminez les paramètres optimaux.
16. Vérifiez les résultats par une expérience de confirmation.

II.5.3. Tableau orthogonal L27 avec résultats et rapports S/N

Le plan d'expériences orthogonal L27(3^3) a été choisi car il permet de tester trois facteurs à trois niveaux différents chacun, dans 27 expériences. Ce plan garantit l'orthogonalité et l'équilibre expérimental. Le rapport signal/bruit est calculé selon le critère suivant : les valeurs élevées sont préférables pour la dureté et les valeurs faibles pour la qualité de surface.

Tableau II.3 : Plan d'expériences L27 avec résultats de rapports S/N

essais	ap	F	N	H	Ra	RAPPORT SB1(H)	RAPPORT SB2(Ra)
1	0.100	0.045	440	381	1.422	51.6184995	-3.0593492
2	0.100	0.045	900	432	0.652	52.7096749	3.71208816
3	0.100	0.045	1500	424	0.371	52.5473171	8.60992085
4	0.100	0.157	440	620	1.853	55.8478338	-5.3590707
5	0.100	0.157	900	649	0.939	56.2448939	0.54771601

6	0.100	0.157	1500	604	0.906	55.6207388	0.86169801
7	0.100	0.225	440	657	0.596	56.3513074	4.50155439
8	0.100	0.225	900	648	0.494	56.2315001	6.11764997
9	0.100	0.225	1500	663	0.488	56.4302706	6.23555978
10	0.200	0.045	440	647	0.353	56.2180856	9.03630779
11	0.200	0.045	900	661	0.400	56.4040292	7.95880017
12	0.200	0.045	1500	646	0.499	56.2046504	6.03992337
13	0.200	0.157	440	647	0.509	56.2180856	5.86754063
14	0.200	0.157	900	666	0.664	56.4694846	3.55082651
15	0.200	0.157	1500	650	1.030	56.2582671	-0.2567445
16	0.200	0.225	440	648	1.286	56.2315001	-2.181817
17	0.200	0.225	900	652	1.072	56.2849519	-0.6056961
18	0.200	0.225	1500	641	1.001	56.1371606	-0.0096456
19	0.300	0.045	440	676	0.240	56.5989339	12.3957752
20	0.300	0.045	900	628	0.307	55.9591929	10.2666685
21	0.300	0.045	1500	643	0.267	56.1642195	11.4806254
22	0.300	0.157	440	645	0.409	56.1911943	7.76789382
23	0.300	0.157	900	650	0.422	56.2582671	7.48917826
24	0.300	0.157	1500	669	0.481	56.5085224	6.35509226
25	0.300	0.225	440	634	0.396	56.0417852	8.05585023
26	0.300	0.225	900	649	0.433	56.2448939	7.26355805
27	0.300	0.225	1500	704	0.457	56.9514532	6.80801375

II.5.4 Analyse par la Méthode de Taguchi — Plan L27

II.5.4.1 Analyse de l'influence des facteurs sur la Dureté (H)

Le rapport signal sur bruit S/N utilisé pour la dureté est de type (les grandes valeurs sont préférables), selon la formule :

$$S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\sum \frac{1}{y^2}}{n} \right)$$

L'analyse des moyennes des rapports S/N pour chaque facteur montre que :

La profondeur de passe (ap) présente les valeurs moyennes de S/N suivantes : 52.87 pour le niveau 1 (ap = 0.100 mm), 55.89 pour le niveau 2 (ap = 0.200 mm), et 56.47 pour le niveau 3 (ap = 0.300 mm). Le delta obtenu est de 3.60, ce qui en fait le facteur le plus influent sur la dureté.

L'avance (F) présente des valeurs moyennes de S/N de 53.12, 55.43 et 56.58 pour les niveaux 1, 2 et 3 respectivement, avec un delta de 3.46, ce qui lui confère le deuxième rang d'influence.

La vitesse de rotation (N) présente des valeurs moyennes de S/N de 54.21, 55.10 et 55.92, avec un delta de 1.71, ce qui représente l'influence la plus faible parmi les trois facteurs.

On constate donc que la dureté augmente progressivement avec l'augmentation de a_p et de F . Les conditions optimales pour maximiser la dureté sont : $a_p = 0.300$ mm, $F = 0.225$ mm/tr, $N = 1500$ tr/min.

II.5.4.2 Analyse de l'influence des facteurs sur la Rugosité (R_a)

Le rapport signal sur bruit S/N utilisé pour la rugosité est de type (les petites valeurs sont préférables), selon la formule :

$$S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\sum Y^2}{n} \right)$$

L'analyse des moyennes des rapports S/N pour chaque facteur montre que :

La profondeur de passe (a_p) présente les valeurs moyennes de S/N de 3.82, 2.15 et 8.96 avec un delta de 6.81, ce qui en fait le facteur dominant sur la rugosité de surface.

L'avance (F) présente des valeurs moyennes de S/N de 7.63, 3.21 et 4.09 avec un delta de 4.42, occupant ainsi le deuxième rang d'influence sur la rugosité.

La vitesse de rotation (N) présente des valeurs moyennes de S/N de 4.12, 5.87 et 4.93 avec un delta de 1.75, confirmant son faible impact sur la rugosité de surface.

Les conditions optimales pour minimiser la rugosité sont : $a_p = 0.100$ mm, $F = 0.045$ mm/tr, $N = 440$ tr/min

Tableau II.4 : les paramètres appropriés à utiliser dans notre expérience

Groupe	A_p	F	N	H	R_a	RAPPORT SB1 (S\N)	RAPPORT SB2(S\N)
A(optimum) Ra faible	0.300	0.045	440	676	0.240	56.5989	12.3958
	0.300	0.045	1500	643	0.267	56.1642	11.4806
	0.300	0.045	900	628	0.307	55.9592	10.2667
B(Dureté max)	0.300	0.225	1500	704	0.457	56.9515	6.80801
	0.300	0.157	1500	669	0.481	56.5085	6.35509
C (Ra max)	0.100	0.045	440	381	1.422	51.6185	-3.05935
	0.100	0.157	440	620	1.853	55.8478	-5.35907
	0.200	0.225	440	648	1.286	56.2315	-2.18182

Les conditions optimales obtenues seront ensuite utilisées pour réaliser les essais de brunissage sur l'acier AISI 1045. Enfin, les éprouvettes seront soumises à des essais de corrosion par la

méthode de perte de masse dans une solution de NaCl à 3,5 % pendant 10 jours afin d'évaluer l'effet du brunissage sur la résistance à la corrosion du matériau.

II.6. Procédure Expérimentale du Brunissage

II.6.1. Préparation des éprouvettes

Avant chaque Brunissage, les échantillons ont été préparés selon le protocole suivant :

1. Pré-usinage par tournage pour obtenir une surface initialement lisse, en utilisant les paramètres de coupe suivants :

Vitesse de rotation : $N = 900 \text{ mm/tr}$

Avance : $f = 0.157 \text{ mm/tr}$

Profondeur de passe : $a_p = 0.200 \text{ mm}$

Outil utilisé : outil à charioter droit à plaquette carbure

Machine utilisée : Tour EMCO MAIER Maximat V13.

2. Nettoyage des échantillons à l'acétone pour éliminer toute trace de lubrifiant ou d'oxydation.
3. Mesure de la rugosité (R_a) et de la dureté leeb (HL) initiales (état de référence avant polissage).
4. Masse initiale (m_i) de l'échantillon (pour les essais corrosion).



Figure.II,4: Opération de brunissage.

II.7. Méthodes de Caractérisation de la Surface

II.7.1. Mesure de la rugosité de surface Ra

II.7.1.1. Définition du paramètre Ra

Le paramètre de rugosité de surface, Ra, est le critère le plus couramment utilisé pour caractériser la qualité de surface.

II.7.1.2. Appareil de mesure

La rugosité de surface a été mesurée à l'aide d'un rugosimètre à contact. Chaque mesure a été effectuée trois fois à différents endroits de l'échantillon, et la valeur moyenne de Ra a été enregistrée.



Figure II.5: rugosimètre à contact.

II.7.2. Mesure de la dureté H(HL)

II.7.2.1. Principe de la dureté

La dureté Leeb (HL) est mesurée par rebond dynamique. Un corps de masse spécifique est projeté sur la surface de l'échantillon. Cette méthode est particulièrement adaptée aux mesures sur site et aux pièces de grandes dimensions, car elle ne nécessite ni préparation de surface poussée ni montage de la pièce dans une machine de tour conventionnelle .

II.7.2.2. Appareil de mesure

La dureté a été mesurée à l'aide d'un duromètre portable Leeb. Cet appareil permet une évaluation rapide de la dureté des matériaux métalliques par la méthode du rebond dynamique. Il est particulièrement adapté aux pièces de grande taille et aux mesures effectuées directement sur place.



Figure II.6: Testeur de dureté Leeb portable

Après le processus de brunissage, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau II.5 : Résultats des mesures de dureté H(HL) et de rugosité Ra après brunissage

	N	f	Ap	P1 H (HL)	P1 Ra (µm)	P2 H (HL)	P2 Ra (µm)	P3 H (HL)	P3 Ra (µm)	Moyenne (HL)	Moyenne (Ra)
1	440	0.045	0.3	469	1.32	481	0.33	498	0.24	482.6	0.63
2	1500	0.045	0.3	492	0.38	498	0.19	511	0.19	500.3	0.25
3	900	0.045	0.3	495	0.3	504	0.16	513	0.15	504	0.20
4	1500	0.225	0.3	504	0.81	494	0.41	523	0.2	507	0.47
5	1500	0.157	0.3	480	0.73	507	0.39	525	0.21	504	0.44
6	440	0.045	0.1	490	0.82	480	0.2	496	0.25	488.6	0.42
7	440	0.157	0.1	491	2.36	507	2.25	497	0.92	498.3	1.84
8	440	0.225	0.1	501	1.8	521	1.17	500	1.85	507.3	1.60

II.8. Essai de Corrosion par Perte de Masse

II.8.1. Principe de la méthode

La méthode de perte de masse est une technique gravimétrique classique d'évaluation de la résistance à la corrosion. Elle consiste à immerger les échantillons dans une solution corrosive pendant une durée déterminée, puis à mesurer la perte de masse due à la dissolution du métal par corrosion.



Figure.II.7: Technique de perte de masse

La perte de masse spécifique Δm est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\Delta m = \frac{(m_1 - m_2)}{S} \left[\frac{g}{cm^2} \right] \dots \dots \dots (II.3)$$

où : m_1 = masse initiale (g), m_2 = masse finale après immersion (g), S = surface exposée de l'éprouvette (cm^2).

II.8.2. Procédure opératoire des essais de corrosion par méthode de perte de masse

1. Préparation des échantillons

Avant les essais de corrosion, les surfaces ont été préparées par polissage progressif à l'aide de papiers abrasifs SiC de différentes granulométries afin d'obtenir une surface homogène. Les échantillons ont ensuite été nettoyés à l'acétone afin d'éliminer toute trace d'huile, de graisse ou d'impuretés, puis séchés à l'air libre.



Figure.II.8 : Préparation de l'échantillon par ponçage

2. Application du vernis

- Côtes non exposés
- Zones à protéger
- Le vernis fait partie de la masse initiale



Figure.II.9 : Application d'une couche de vernis sur l'échantillon

3. Mesure des dimensions et pesée initiale

Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse afin de déterminer la surface exposée à la corrosion.

Chaque échantillon a ensuite été pesé à l'aide d'une balance analytique de précision avant immersion afin d'obtenir la masse initiale (m_0).

La pièce fabriquée est de forme cylindrique. La corrosion se produit uniquement sur la surface latérale (les deux faces arrondies sont protégées par une couche de vernis). Par conséquent, la surface est : $S = 2\pi R h$(II.4)

Tableau II.6. : Résultats de surface

essais	R(mm)	h(mm)	S(mm ²)
1	35.2	8	1769.34
2	35.4	8	1779.40
3	35.3	7.56	1676.78
4	35.5	7.8	1739.81
5	35.6	8	1789.45
6	35.82	7.8	1755.50
7	39.78	8.4	2099.54
8	39.68	8.54	2129.17
9	39.8	8.5	2125.60

4. Préparation de la solution corrosive

La solution corrosive a été préparée en dissolvant du chlorure de sodium (NaCl) dans de l'eau distillée afin d'obtenir une concentration de 3,5 %, simulant un environnement marin.

Pour chaque bécher de 250 mL :

- 8,75 g de NaCl ont été dissous dans 250 mL d'eau distillée.
- La solution a été agitée jusqu'à dissolution complète du sel.

Calcul de la quantité de NaCl

Une solution à 3,5 % signifie : 3,5 g de NaCl → 100 mL d'eau

Donc pour 250 mL :

$$(3,5 \times 250) / 100 = 8,75 \text{ g}$$

Verser environ 200 mL d'eau distillée dans le bécher, ajouter le NaCl, agiter jusqu'à dissolution complète.

Tableau II.7: Caractéristiques de la solution corrosive

Paramètre de la solution	Valeur
Composition de la solution	Eau déminéralisée + NaCl
Concentration	3.5 %
Température d'essai	24 °C
Volume de solution	250 mL

5. Immersion

- Suspendre les échantillons
- Éviter tout contact entre eux
- Température ambiante

Durée : 10 jours

6. Après immersion

- Retirer les échantillons
- Rincer à l'eau distillée
- Nettoyer les produits de corrosion
- Sécher à l'air libre

7. Pesée finale

Mesurer la masse finale (m_f) de chaque échantillon à l'aide de la balance analytique.



Figure.II.10 : Balance analytique utilisée pour la mesure de la masse des échantillons

8. Calcul de la perte de masse

$$\Delta m = m_1 - m_2 \dots \dots \dots (II.5)$$

Tableau II.8 : Résultats des essais de corrosion par perte de masse (9 essais)

Essai	m_0 (g)	m_1 (g)	Δm
1	53.1902	53.1654	0.0248
2	54.9636	54.9375	0.0261
3	50.5954	50.5760	0.0194
4	54.1104	54.1063	0.0041
5	55.5968	55.5950	0.0018

6	54.0027	54.0012	0.0015
7	72.4028	72.3978	0.0050
8	75.5987	75.5888	0.0099
9	70.70043	70.60043	0.1000

Tableau II.8 : Résultats des essais de corrosion par perte de masse spécifique (9 essais)

Essai	m_0 (g)	m_1 (g)	$S(mm^2)$	Δm (g/cm ²)
1	53.1902	53.1654	1769.34	0.001402
2	54.9636	54.9375	1779.40	0.001467
3	50.5954	50.5760	1676.78	0.001157
4	54.1104	54.1063	1739.81	0.000236
5	55.5968	55.5950	1789.45	0.000101
6	54.0027	54.0012	1755.50	0.000085
7	72.4028	72.3978	2099.54	0.000238
8	75.5987	75.5888	2129.17	0.000465
9	70.70043	70.60043	2125.60	0.004705

9. Détermination du taux de corrosion

Le taux de corrosion est calculé à partir de la perte de masse mesurée, de la surface exposée et du temps d'immersion, afin de déterminer la résistance du matériau dans un environnement corrosif.

Le taux de corrosion est calculé selon la formule suivante :

$$\tau = \frac{365 \times \Delta m}{(S \times t)} \dots\dots\dots \text{(II.6)}$$

Tableau II.9. : Résultats du taux de corrosion τ pour les 9 essais

Essai	t (j)	mi (g)	mf (g)	Δm (g)	S (cm ²)	τ (g/cm ² .an)
1	10	53.1902	53.1654	0.0248	17.6934	0.051160
2	10	54.9636	54.9375	0.0261	17.794	0.053538
3	10	50.5954	50.5760	0.0194	16.7678	0.042230
4	10	54.1104	54.1063	0.0041	17.3981	0.008602
5	10	55.5968	55.5950	0.0018	17.8945	0.003672
6	10	54.0027	54.0012	0.0015	17.555	0.003119
7	10	72.4028	72.3978	0.005	20.9954	0.008692
8	10	75.5987	75.5888	0.0099	21.2917	0.016971
9	10	70.70043	70.60043	0.1	21.256	0.17172

10. Définition de i_{corr} (densité de courant de corrosion)

La densité de courant de corrosion (i_{corr}) est un coefficient électrochimique fondamental qui détermine la vitesse de dissolution d'un métal à l'interface métal-solution. Elle s'exprime en microampères par centimètre ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Plus la valeur de i_{corr} est faible, plus le matériau est résistant à la corrosion.

i_{corr} est calculée à partir de mesures de masse (perte de masse) selon la loi de Faraday.

2. Formule de calcul (Loi de Faraday)

La densité de corrosion est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$i_{\text{corr}} = (\Delta m \times n \times F) / (M \times S \times t) \quad [\mu\text{A}/\text{cm}^2] \dots \dots \dots \text{(II.7)}$$

Tableau II.10 : Paramètres utilisés pour le calcul de (i_{corr})

Symbole	Signification	Valeur utilisée
Δm	Perte de masse (g)	Tableau II.9
n	Nombre d'électrons échangés ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$)	2
F	Constante de Faraday	96 485 C/mol
M	Masse molaire du fer	55,85 g/mol
S	Surface exposée à la corrosion (cm^2)	Tableau II.6
t	Durée d'immersion en secondes (10 jours)	864 000 s

3. Exemple : Essai n° 1

$$0,0248 \times 2 \times 96\,485 / 55,85 \times 17,6934 \times 864\,000 = 5,60 \text{ } (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

Tableau II.11 : les résultats i_{corr} pour les 9 essais

Essai	Δm (g)	S (cm^2)	t (s)	$n \times F$ (C/mol)	M (g/mol)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	0.0248	17.6934	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	5.61
2	0.0261	17.7940	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	5.87
3	0.0194	16.7678	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	4.63

4	0.0041	17.3981	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	0.94
5	0.0018	17.8945	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	0.40
6	0.0015	17.5550	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	0.34
7	0.0050	20.9954	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	0.95
8	0.0099	21.2917	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	1.86
9	0.1000	21.2560	864 000	$2 \times 96\,485$	55,85	18.81

Conclusion

Ce chapitre présente une vue d'ensemble du cadre expérimental de l'étude, depuis la sélection des matériaux et la préparation des échantillons jusqu'à la conception du protocole expérimental par la méthode Taguchi, en passant par les tests de qualité de surface et de corrosion. La validité et la fiabilité des procédures expérimentales ont été vérifiées, ouvrant la voie à l'analyse des données recueillies. dont les détails seront exposés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Étude et analyse des résultats expérimentaux

Introduction

Ce chapitre constitue le pilier central de l'étude, dans la mesure où il présente une analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus après l'application du brunissage par bille sur des échantillons en acier AISI 1045. Après que les deux chapitres précédents ont traité le cadre théorique et la méthodologie expérimentale adoptée, ce chapitre vient concrétiser les résultats effectifs des expériences et les soumettre à l'étude et à l'interprétation.

L'analyse repose sur trois axes principaux : l'étude de l'effet des paramètres d'usinage (vitesse de rotation, avance, profondeur de passe) sur la rugosité de surface R_a à travers les diagrammes du rapport signal sur bruit (S/N), puis l'étude de l'effet de ces mêmes paramètres sur la dureté de surface $H(HL)$, et enfin l'évaluation de la résistance des échantillons à la corrosion via l'analyse du taux de corrosion et de la densité de courant de corrosion i_{corr} , dérivés des essais de perte de masse dans une solution de NaCl à 3,5 %.

III.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité R_a

III.1.1. Graphique des rapports Signal/Bruit (S/N) pour R_a

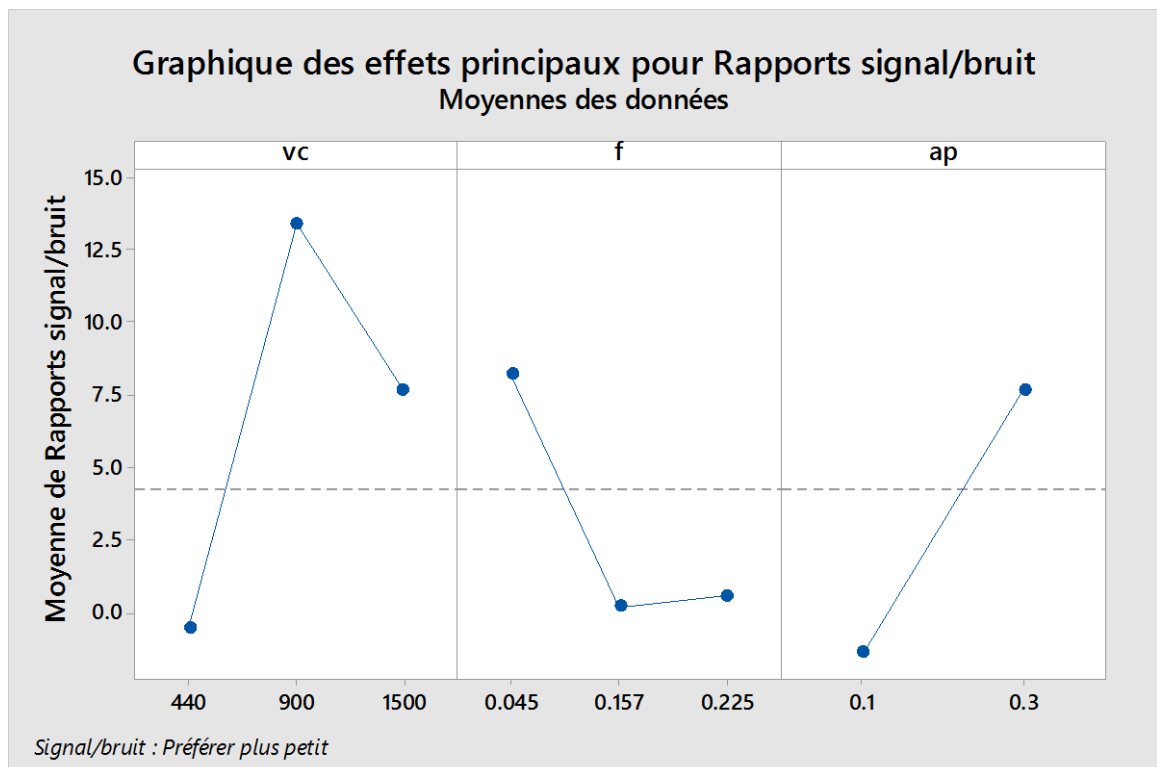


Figure III.1. : Influence des facteurs principaux (N , f , ap) sur le rapport signal/bruit de la rugosité de surface R_a

La norme applicable est « plus la valeur est basse, mieux c'est » (réduction de la rugosité de surface R_a). Un rapport signal/bruit (S/N) élevé indique donc une meilleure qualité de surface

Vitesse de rotation N : Le rapport signal/bruit atteint sa valeur maximale à $N = 900$ tr/min puis diminue à $1\,500$ tr/min. À 440 tr/min, la valeur est minimale (≈ 0 dB). Cela indique que la rugosité de surface est minimale et la plus reproductible à des vitesses moyennes. À basse vitesse, le temps de contact de l'outil avec la pièce est plus long, générant davantage de vibrations et entraînant ainsi une détérioration de la surface. À très haute vitesse, l'effet plastifiant devient insuffisant en raison du temps de contact trop court.

Vitesse d'avance (f) : Le rapport signal/bruit (SNR) est maximal à $f = 0,045$ mm/tr, puis chute brutalement à $f = 0,157$ mm/tr (valeur minimale $\approx 0,4$ dB), avant de remonter légèrement à $f = 0,225$ mm/tr. Cette chute à $f = 0,157$ mm/tr indique que cette vitesse d'avance engendre la rugosité la plus importante et la stabilité la plus faible. La faible vitesse d'avance ($0,045$ mm/tr) permet à l'outil de passer plusieurs fois sur la même zone, renforçant ainsi le lissage par déformation plastique.

Profondeur de pénétration (a_p) : Le rapport signal/bruit est minimal à $a_p = 0,1$ mm ($\approx -0,3$ dB), puis remonte légèrement à $a_p = 0,2$ mm, avant d'atteindre sa valeur maximale à $a_p = 0,3$ mm ($\approx 7,5$ dB). L'augmentation de la profondeur de pénétration intensifie la déformation plastique de surface, aplanit les aspérités et améliore la qualité de la surface.

Rapport signal/bruit optimal (R_a) : $N = 900$ tr/min, $f = 0,045$ mm/tr/min, $a_p = 0,3$ mm

III.2. Analyse des effets principaux sur la dureté superficielle $H(HL)$

III.2.1. Graphique des rapports Signal/Bruit (S/N) pour H

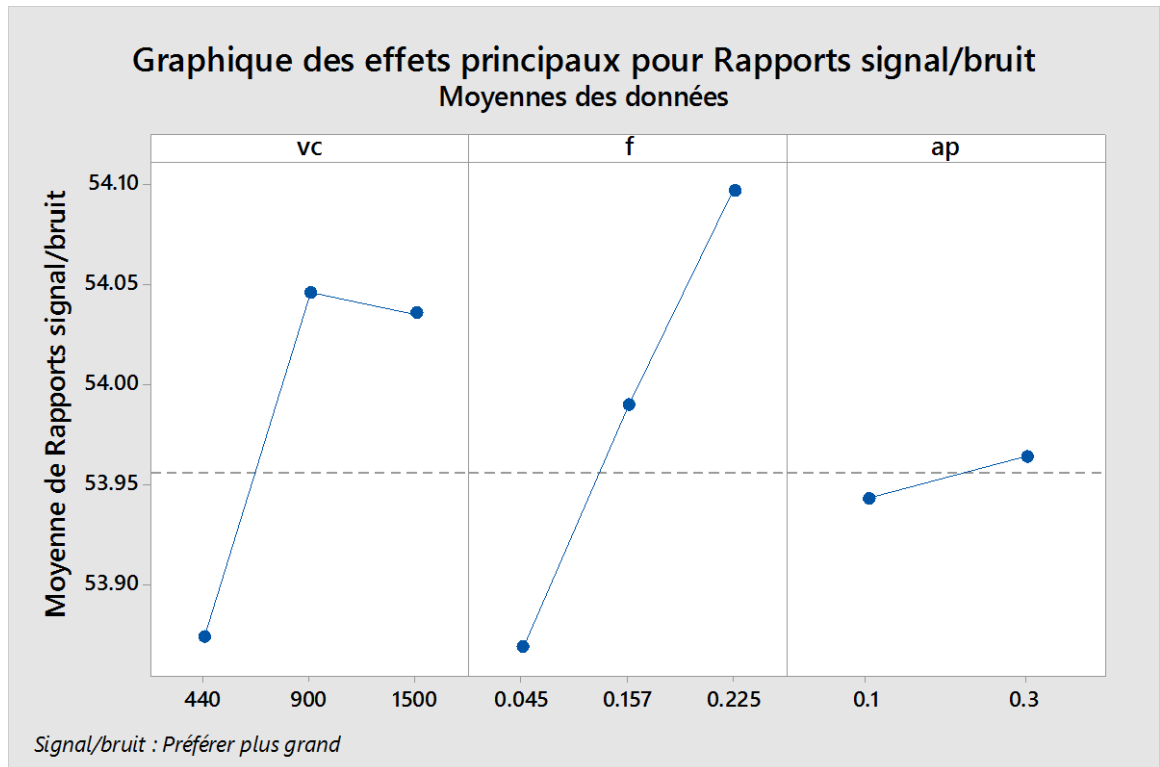


Figure III.2. : Influence des facteurs principaux (vc , f , ap) sur le rapport signal/bruit de la dureté de surface H

La norme étant « plus c'est gros, mieux c'est » (pour une dureté maximale), un rapport signal/bruit plus élevé indique une dureté et une répétabilité accrues.

Vitesse de rotation N : Le rapport signal/bruit est minimal à $N = 440$ mm/tr ($\approx 53,87$ dB), puis augmente à $N = 900$ mm/tr ($\approx 54,05$ dB), avant de diminuer légèrement à $N = 1\,500$ mm/tr ($\approx 54,03$ dB). Ces variations étant mineures ($< 0,2$ dB), vc a un effet limité sur la dureté. La vitesse optimale est de 900 mm/tr.

Vitesse d'avance f : Le rapport signal/bruit (S/N) est minimal à $f = 0,045$ mm/tr ($\approx 53,87$ dB), puis augmente à $f = 0,157$ mm/tr ($\approx 54,00$ dB) et atteint sa valeur maximale à $f = 0,225$ mm/tr ($\approx 54,10$ dB). Ce rapport augmente de façon constante : plus la vitesse d'avance est élevée, plus la pression exercée sur la surface est importante, ce qui entraîne un moulage accru et, par conséquent, une dureté accrue.

Profondeur de pénétration ap : Le rapport signal/bruit (S/N) est minimal à $ap = 0,1$ mm ($\approx 53,93$ dB) et atteint sa valeur maximale à $ap = 0,3$ mm ($\approx 53,97$ dB). La plage de variation est très faible, ce qui indique un effet peu marqué de la profondeur de pénétration (ap) sur la ténacité, bien que la tendance générale soit à la hausse.

Valeurs optimales du rapport signal/bruit (H) : $N = 900$ mm/tr, $f = 0,225$ mm/tr/min, $a_p = 0,3$ mm

III.3. Analyse des résultats de corrosion

III.3.1. Histogramme du taux de corrosion τ

Le graphique du taux de corrosion (τ) permet de comparer les performances des différents essais réalisés. Ce graphique met en évidence l'influence des paramètres de brunissage sur la résistance à la corrosion de l'acier étudié.

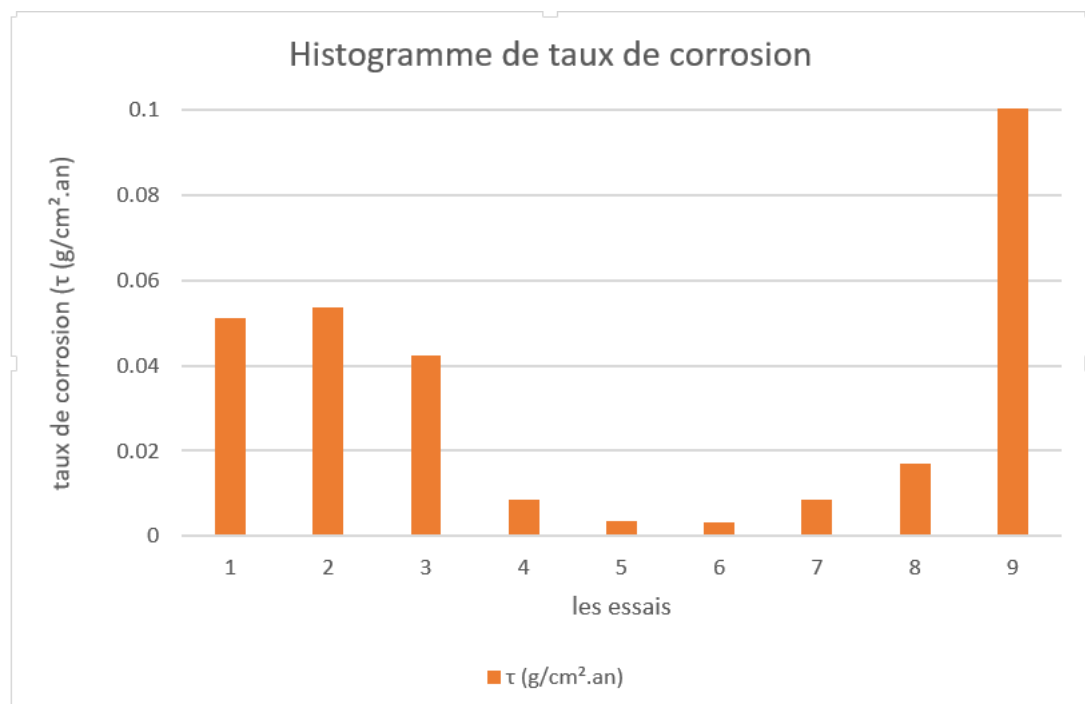


Figure III.3. : Histogramme du taux de corrosion (τ) pour les 9 essais

Les essais 1 à 8 présentent des valeurs de taux d'usure (τ) très faibles ($< 0,055$ g/cm².an), quasiment indiscernables sur le graphique. L'essai 9 constitue un cas particulier : n'ayant subi aucun brunissage, il représente l'état de surface après usinage (référence non traitée). ($\tau \approx 1,18$ g/cm².an), valeur supérieure à celle de tous les essais avec brunissage, ce qui confirme l'effet positif de brunissage sur la résistance à la corrosion.

III.3.2. Carte de icorr

La carte de courant de corrosion (i_{Corr}) illustre l'évolution de la densité de courant de corrosion lors de différents essais. Cet indicateur constitue une mesure importante de la résistance à la corrosion : plus la valeur de i_{Corr} est faible, plus le matériau est résistant à la corrosion.

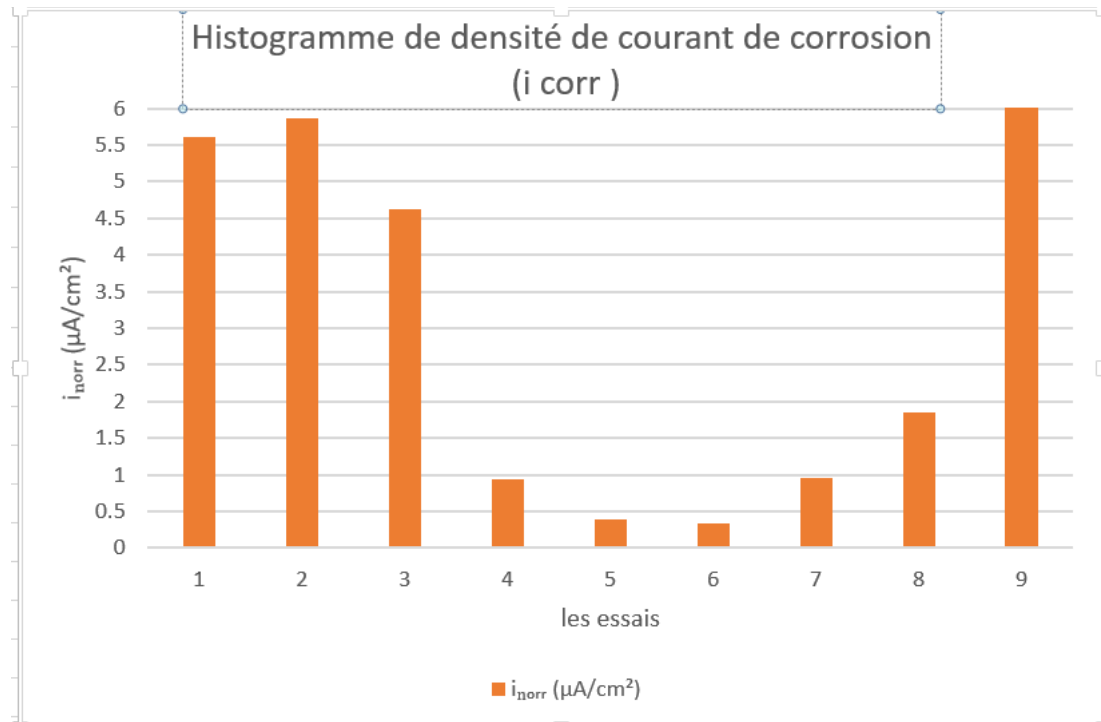


Figure III.4. : Évolution de la densité de courant de corrosion (i_{corr}) pour les 9 essais

Cette tendance est encore plus marquée : le courant de corrosion (i_{Corr}) lors du test 9 (échantillon brut non poli) atteint environ $18,81 \mu A/cm^2$, contre des valeurs inférieures à $6 \mu A/cm^2$ pour tous les tests avec brunissage. Cette différence significative démontre l'efficacité du brunissage pour améliorer la résistance à la corrosion. Parmi les tests 1 à 8, on observe les résultats suivants :

Tests 1 à 3 (basse fréquence) : courant de corrosion (i_{Corr}) compris entre $4,6$ et $5,9 \mu A/cm^2$ – résistance moyenne

Tests 4 à 6 (moyenne fréquence, basse tension) : courant de corrosion (i_{Corr}) compris entre $0,34$ et $0,94 \mu A/cm^2$ – résistance optimale

Tests 7 et 8 (haute fréquence, moyenne tension) : courant de corrosion (i_{Corr}) compris entre $0,95$ et $1,86 \mu A/cm^2$ – résistance acceptable

L'essai n° 9, réalisé sans brunissage, représente l'échantillon de référence après traitement. La valeur exceptionnellement élevée d' i_{corr} ($\approx 18,81 \mu A/cm^2$) souligne le rôle protecteur du brunissage: ce traitement réduit la corrosion d'un facteur de 3 à 5 en épaississant et en lissant la couche superficielle, limitant ainsi la diffusion des ions chlorure. Ce résultat confirme l'intérêt du brunissage pour améliorer la résistance à la corrosion.

Conclusion

Les résultats de ce chapitre révèlent une variation notable de la réponse de la surface en fonction des paramètres de brunissage. En effet, tous les niveaux de paramètres n'ont pas conduit à des améliorations équivalentes ; certaines combinaisons ont même présenté une contradiction entre l'obtention d'une rugosité minimale et d'une dureté maximale simultanément, ce qui impose de définir les priorités selon les exigences de l'application industrielle visée.

Par ailleurs, la chute marquée de la densité de courant de corrosion — de $18,81 \mu A/cm^2$ pour l'échantillon non traité à moins de $6 \mu A/cm^2$ pour les échantillons brunis — indique que l'amélioration ne se limite pas à la dimension géométrique de la surface, mais s'étend à sa structure mécanique interne, sous l'effet des contraintes de compression générées au cours du processus de brunissage.

Ces résultats demeurent liés aux conditions expérimentales adoptées, et ouvrent la voie à une discussion plus approfondie sur la possibilité de généraliser les paramètres optimaux à différentes dimensions de coupe et géométries de pièces.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a porté sur l'étude de l'effet du brunissage par bille sur les propriétés de surface de l'acier AISI 1045, en s'appuyant sur une méthodologie expérimentale structurée basée sur un plan d'expériences de Taguchi. L'objectif était d'analyser séparément l'influence des paramètres de brunissage – vitesse de rotation (N), avance (f) et profondeur de passe (ap) – sur la rugosité de surface, la dureté et la résistance à la corrosion.

Les résultats ont montré que le brunissage réduisait significativement la rugosité de surface (R_a) par rapport à l'état brut de fabrication, indiquant une amélioration notable de la qualité de surface. Concernant la dureté (H(HL)), les mesures ont confirmé l'effet durcissant du procédé, montrant une nette amélioration par rapport à la pièce non traitée.

L'application de la méthode du rapport signal/bruit (S/N) nous a permis de déterminer les conditions optimales pour chaque réponse séparément : pour la rugosité minimale, les paramètres optimaux sont $N = 900$ tr/min, $f = 0,045$ mm/tr et $a_p = 0,3$ mm ; pour la dureté maximale, ils sont $N = 900$ tr/min, $f = 0,225$ mm/tr et $a_p = 0,3$ mm. Ces conditions n'étant pas identiques, le choix des paramètres dépendra de la priorité fixée selon l'application visée.

L'analyse des résultats de corrosion a mis en évidence l'efficacité du brunissage pour améliorer la résistance à la corrosion. Les valeurs du taux de corrosion (τ) et de la densité de courant (i_{corr}) étaient significativement inférieures pour les échantillons brunis par rapport à l'échantillon témoin non traité (Essai 9), confirmant l'effet positif du brunissage sur la résistance en milieu corrosif.

À l'avenir, il sera intéressant d'étendre cette étude à d'autres types d'acier et d'explorer d'autres méthodes pour étudier l'effet du brunissage sur la résistance aux contraintes.

Références bibliographiques

- [1] Setti S.G. (2022). A review on latest trends in ball and roller burnishing processes for enhancing surface finish. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 8, No. 4, pp. 4499–4523. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2077534>
- [2] Fuhong Steel (Round Bars). *AISI 1045 Steel – Properties and Heat Treatment*. Available at: <https://www.round-bars.com/products/aisi-1045-steel>
- [3] Shanghai Totem Machinery Co., Ltd. (n.d.). Totem high quality OEM 1045 S45C 42CrMo4 steel forging gear shaft with high precision machining. Made-in-China.
- [4] VXB Bearings. (n.d.). High torque AISI 1045 steel jaw coupling with elastomer spider. VXB.
- [5] ACDelco. (n.d.). 45A1045 outer steering tie rod end. FinditParts.
- [6] Rachedi Saad Eddine, Bachiri Khair Eddine – Étude des critères de la rugosité en tournage à sec de l'acier 42CD4 par logique floue – Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie – (non disponible) – Mémoire Master – 2018
- [7] (Mahdjoub Mohammed Omar , Abi Mouloud Abderrahmane) – Planification optimisée d'une opération de chariotage (tournage multi-passes) – Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie– Mémoire Master – (2020/2021)
- [8]. (Rahmani, M. A., & Ouggad, Y) – Recherche expérimentale sur l'impact du brunissage sur la dureté des matériaux usinés – Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie– Mémoire Master – (2023/2024)
- [9]. Solanki R.G., Patel K.A., Dhruv R.B., “Effect of burnishing process parameters on surface quality – A Review”, *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 4, n° 2, ISSN 2321-9939, Inde, 2016.
- [10] Raza A., Kumar S. (2022). A critical review of tool design in burnishing process. *Tribology International*, 174, 107717. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107717>
- [11] Setti S.G. (2022). A review on latest trends in ball and roller burnishing processes for enhancing surface finish. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 8, No. 4, pp. 4499–4523. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2077534>
- [12] El-Axir M.H. (2000). An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(11), pp. 1603–1617.
- [13] Ghodake A.P., Rakhade R.D., Maheshwari A.S. (2013). Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials – A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 5, No. 5, pp. 09–20.

- [14] El-Axir M.H., Ibrahim A.A. (2005). Some surface characteristics due to center rest ball burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(1), pp. 47–53
- [15]. Ghodake A.P., Rakhade R.D., Maheshwari A.S., “Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials – A Review”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 5, no. 5, pp. 09–20, 2013, e-ISSN: 2278-1684.
- [16]. Khaled Ayman, "Influence du brunissage sur le comportement en traction d'un acier à usage courant", Université Badji Mokhtar - Annaba, Faculté: Technologie, Département: Génie Mécanique, Master en Génie Des Matériaux, Année Universitaire: 2021/2022.
- [17]. Jayprakash P Dataniya, Dr. Utkarshkumar A Patel, Dr. Ashwinkumar V Patel, Nitin Pranami, Pradhumansinh R Basia, Jigishkumar J Goswami, Dheeraj Chandra, Amitkumar B. Solanki. "Advanced Techniques in Burnishing Tools for Surface Finish Improvement: A Comprehensive Review". *Nanotechnology Perceptions*, ISSN: 1660-6795, www.nano-ntp.com, Vol. 20, 2024.
- [18] Amira Mohammed Toufik, Boulifa Ayman Taha – Prédiction Intelligente de la Micro-dureté des Surfaces après Fraisage – Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie – Mémoire Master – 2019
- [19] Zhang Y. et al. (2022). A Review of Low-Plasticity Burnishing and Its Applications. *Advanced Engineering Materials*, 24(10), 2200365. <https://doi.org/10.1002/adem.202200365>
- [20] Sachin B., Narendranath S., Chakradhar D. (2019). Enhancement of surface integrity by cryogenic diamond burnishing toward the improved functional performance of the components. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1665-3>
- [21] Kumar R. et al. (2023). Investigation into Burnishing Process to Examine Effect on Surface Integrity, Wear and Corrosion Resistance of Carbon Alloy (EN31) Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08524-x>
- [22]. R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig. "Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering". John Wiley & Sons, Inc., Publication, ISSN: 0010-9312 (Series), www.wiley.com, Fourth Edition, 2008.
- [23]. Dr. K. Bouhria. "CORROSION ET PROTECTIONS DES METAUX (Support de cours)". Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Faculté de Génie Mécanique, Département des Mines et Métallurgie. www.univ-usto.dz, 2021/2022.
- [24]. Wuhan Corrtest Instruments Corp., Ltd., Potentiostat for Photovoltaic Solar Cell Testing, Made-in-China.com,
- [25] Saldaña-Robles A., Plascencia-Mora H., Aguilera-Gómez E., Márquez-Herrera A., De La Peña J.A.D. (2018). Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion

- resistance of AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 339, 191–198.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.013>
- [26] Márquez-Herrera A., Saldaña-Robles A., Reveles-Arredondo J.F., Dorantes-Flores J.L., Gallardo-Hernandez E.A., Capilla-González G. (2023). Effect of slide burnishing on the corrosion resistance and surface roughness on high strength steels. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(10), 1–10. <https://doi.org/10.1177/16878132231201794>
- [27] Raza A., Kumar S. (2025). A comparative investigation on the surface characteristics of AISI 304 and AISI 1045 steel influenced by turning combined with ball burnishing. *Journal of Materials: Design and Applications*. <https://doi.org/10.1177/14644207241263793>
- [28] Oliveira D.A., Brito P.P., Magalhães F.C. et al. (2025). The influence of deep rolling on the surface integrity of annealed AISI 1045 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16154-x>
- [29] Avilés R., Albizuri J., Rodríguez A., López De Lacalle L.N. (2013). Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue*, 55, 230–244.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024>
- [30] Seemikeri C.Y., Brahmanekar P.K., Mahagaonkar S.B. (2008). Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. *Tribology International*, 41(8), 724–734.
- [31] Amini S., Baraheni M., Hakimi E. (2018). Experimental study on the effect of ultrasonic-assisted ball burnishing on aluminum alloy and AISI 1045. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [32] Nguyen T.T., Le X.B., Nguyen T.A. (2022). Experimental modeling and optimization of surface quality and energy consumption in the roller burnishing process of AISI 1045 steel using intelligent models. *Journal of Manufacturing Processes*.
- [33] Corner, L. (2024). *AISI 1045 medium carbon steel*. AZoM.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>
- [34] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, 2005.
- [35] Minitab Inc., *Introduction to Minitab*, www.minitab.com

ملخص

تركز هذه الدراسة على التقييم التجريبي لتأثير الصقل الكروي (Ball Burnishing) على جودة سطح فولاذ AISI 1045 ومقاومته للتآكل. ويهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير معلمات التشغيل على خشونة السطح والصلابة، بالإضافة إلى دراسة سلوك المادة تجاه التآكل.

في البداية، تم استعراض الجوانب النظرية المتعلقة بخصائص فولاذ AISI 1045 ، ومبادئ الصقل الكروي، وآليات التآكل المختلفة. بعد ذلك، تم اعتماد منهجية تجريبية قائمة على طريقة تاغوشي (Taguchi) لتحديد ظروف التشغيل المثلى. وشملت الدراسة ثلاثة متغيرات رئيسية هي: سرعة دوران المغزل، ومعدل التغذية، وعمق الاختراق.

أُجريت عمليات الصقل على عينات مصنعة باستعمال مخرطة تقليدية، ثم خضعت العينات لعمليات توصيف شملت قياس خشونة السطح (Ra) ، واختبار الصلابة بطريقة ليب (HL) ، بالإضافة إلى اختبارات فقدان الكتلة في وسط ملحي لتقييم مقاومة التآكل.

أظهرت النتائج أن الصقل الكروي يساهم بشكل ملحوظ في تحسين جودة السطح من خلال تقليل قيم الخشونة وزيادة الصلابة السطحية. كما بيّنت الدراسة أن هذا التحسن في جودة السطح ينعكس إيجاباً على مقاومة المادة للتآكل.

ومن خلال تحليل نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) ، تم تحديد العوامل الأكثر تأثيراً على الخصائص المدروسة واستخراج ظروف التشغيل المثلى. وتؤكد النتائج المتحصل عليها أن الصقل الكروي يُعد تقنية فعالة وبسيطة واقتصادية لتحسين جودة السطح وزيادة متانة المكونات الميكانيكية المصنوعة من فولاذ AISI 1045.

Abstract

This study focuses on the experimental evaluation of the effect of ball burnishing on the surface quality and corrosion resistance of AISI 1045 steel. The main objective is to analyze the influence of cutting parameters on surface roughness and hardness, as well as on the material's corrosion behavior.

Initially, a literature review presented the properties of AISI 1045 steel, the principles of burnishing, and the corrosion mechanisms. Subsequently, an experimental approach based on

the Taguchi method was adopted to select the optimal operating conditions. Three cutting parameters were studied: spindle speed, feed rate, and depth of penetration.

The samples were ground on a conventional lathe and then characterized by measurements of roughness (Ra), Leeb Hardness (HL), and mass loss tests in a saline solution. The results show that burnishing significantly improves surface quality by reducing roughness and increasing hardness. Furthermore, this improved surface quality contributes to better corrosion resistance. Analysis of the signal-to-noise ratio (S/N) identified the most important influencing factors and determined the optimal cutting conditions. The results confirm that ball burnishing is an effective, simple, and economical technique for improving the surface finish and durability of AISI 1045 steel mechanical components.

Résumé

Cette étude porte sur l'évaluation expérimentale de l'effet du brunissage à bille sur la qualité de surface et la résistance à la corrosion de l'acier AISI 1045. L'objectif principal est d'analyser l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité et la dureté de surface, ainsi que sur le comportement à la corrosion du matériau.

Dans un premier temps, une revue de la littérature a permis de présenter les propriétés de l'acier AISI 1045, les principes de brunissage et les mécanismes de corrosion. Ensuite, une approche expérimentale basée sur la méthode Taguchi a été adoptée pour sélectionner les conditions opératoires optimales. Trois paramètres de coupe ont été étudiés : la vitesse de rotation, l'avance et la profondeur de pénétration.

Les échantillons ont été rectifiés sur un tour conventionnel, puis caractérisés par des mesures de rugosité (Ra), de dureté Leeb (HL) et par des essais de perte de masse dans une solution saline. Les résultats montrent que le brunissage améliore significativement la qualité de surface en réduisant la rugosité et en augmentant la dureté. De plus, cette amélioration de la qualité de surface contribue à une meilleure résistance à la corrosion.

L'analyse du rapport signal/bruit (S/N) a permis d'identifier les facteurs influents les plus importants et de déterminer les conditions de coupe optimales. Les résultats confirment que le brunissage à bille est une technique efficace, simple et économique pour améliorer l'état de surface et la durabilité des composants mécaniques en acier AISI 1045.