

Usure des aciers outils pour la coupe du bois : influence du revêtement et de la composition chimique

Par

Vanella MBAKOP NANSHIE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GENIE MECANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 11 DECEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Vanella Mbakop Nanshie, 2023



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MEMOIRE A ETE EVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mohammad Jahazi, directeur de mémoire
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Zhaoheng Liu, président du jury
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Omur Dagdeviren, examinateur
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 07 DECEMBRE 2023

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de mémoire, le Professeur Mohammad Jahazi, pour ses précieux conseils, son expertise inestimable, son soutien indéfectible et sa disponibilité tout au long de ce projet de recherche. Sa supervision au sein de la Chaire de recherche en technologies de mise en forme des alliages à haute résistance mécanique (CM2P) a été un pilier essentiel dans la réalisation de ce travail.

Je suis également reconnaissant envers mes collègues de recherche en collaboration avec DK-Spec : Muftah, Hamza, Ludovic et Musa, pour leur esprit critique, leurs commentaires éclairés et leur collaboration fructueuse qui ont grandement contribué à la réussite de cette recherche. Je remercie chaleureusement tous les membres de la chaire de recherche pour leur assistance technique et administrative qui a été d'une grande aide.

Ma gratitude s'étend aussi au personnel de DK-Spec : Majid, Marius, Tom, Antoine et l'ensemble du personnel, pour leur courtoisie, leur disponibilité et l'atmosphère conviviale qu'ils ont créée, facilitant ainsi le déroulement des travaux de recherche.

Mes remerciements les plus sincères vont à mes parents : Nanshie Jean et Djioke Valerie, ainsi qu'à mes frères et sœurs : Donald, Estelle, Carelle et Romuald, qui, malgré la distance, ont toujours cru en moi et m'ont apporté leur soutien et encouragement sans faille.

Je tiens également à remercier mon compagnon Chrysler, pour son soutien constant et ses conseils avisés qui ont été d'une grande aide tout au long de cette aventure académique.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à tous mes amis, proches et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, que ce soit par leurs conseils, encouragements ou critiques constructives. Leur soutien a été une source d'inspiration qui m'a permis d'affronter et de traverser les moments difficiles, et de mener ce travail à son terme.

Ce voyage académique a été enrichissant et édifiant, et les contributions de chacun d'entre vous ont été un élément précieux de cette expérience inoubliable.

Usure des aciers outils pour la coupe du bois : influence du revêtement et de la composition chimique

Vanella MBAKOP NANSHIE

RÉSUMÉ

Le secteur forestier, constituant un pilier économique majeur au Canada, englobe des opérations de transformation du bois requérant des outils à la fois efficaces et résistants à l'usure. Parmi ces outils, le couteau d'équarrisseur joue un rôle crucial. Ce mémoire se consacre à la caractérisation de l'usure des couteaux d'équarrisseur et sonde en profondeur la performance des aciers à outils lors de la première transformation du bois. L'étude aborde initialement les mécanismes d'usure, explorant les causes et manifestations de l'usure, ainsi que leur impact sur la performance des couteaux d'équarrisseur. Trois aciers à outils ont été examinés. Il ressort de cette étude que ces aciers divers sont soumis à une combinaison de mécanismes d'usure, notamment l'usure par abrasion, l'usure par adhérence, et l'usure par impact. Toutefois, les mécanismes prédominants se révèlent être l'abrasion, visible à travers les rayures et la diminution de la netteté de l'arête de coupe, et l'usure par impact, manifestée par des écaillages et des arrachements de matière.

Par ailleurs, une méthodologie de quantification d'usure a été développée, basée sur une approche tridimensionnelle, permettant d'estimer le volume de matière perdu ainsi que le volume perdu spécifiquement par usure abrasive, soulignant la complexité de l'usinage dans l'industrie du bois. Les résultats mettent en évidence l'importance des revêtements pour améliorer la résistance à l'usure des couteaux. Cependant, la présence d'arrachements de matières sur certains couteaux revêtus suggère une fragilité potentielle dans des conditions d'usinage difficiles.

En outre, une machine de test d'usure par abrasion avec roue en caoutchouc présente chez DK-Spec, notre partenaire industriel, a été remise en état, permettant ainsi d'effectuer des tests d'usure selon la norme ASTM G65. De plus, une analyse conformément à la norme ASTM G65 a été menée pour évaluer la résistance à l'usure abrasive des aciers. Les résultats indiquent que l'acier A8mod+1%W revêtu présente la meilleure résistance parmi les aciers revêtus, avec une réduction de l'usure de 49%. En contraste, bien que l'acier W360 ait démontré une excellente résistance intrinsèque, le revêtement n'a pas engendré d'amélioration significative pour cet acier.

Ce mémoire, par son exploration minutieuse et ses découvertes, vise à contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes d'usure des couteaux d'équarrisseur, et à proposer des orientations optimisées pour la sélection des aciers à outils dans l'industrie de la transformation du bois.

Mots clé : Caractérisation de l'usure, Couteaux d'équarrisseur, Aciers à outils, Première transformation du bois, Mécanismes d'usure, Norme ASTM G65, Tests d'usure

Wear of tool steels for wood cutting: Influence of coating and chemical composition

Vanella MBAKOP NANSHIE

ABSTRACT

The forestry sector, being a major economic pillar in Canada, encompasses wood processing operations requiring tools that are both efficient and resistant to wear. Among these tools, the squaring knife plays a crucial role. This thesis is dedicated to the characterization of wear on squaring knives and delves deeply into the performance of tool steels during the initial wood processing. The study initially addresses wear mechanisms, exploring the causes and manifestations of wear, as well as their impact on the performance of squaring knives. Three tool steels were examined. It emerges from this study that these various steels are subjected to a combination of wear mechanisms, notably wear by abrasion, adhesion wear, and impact wear. However, the predominant mechanisms turn out to be abrasion, visible through scratches and the blunting of the cutting edge, and impact wear, manifested through flaking and material tear-outs.

Furthermore, a wear quantification methodology was developed, based on a three-dimensional approach, allowing for the estimation of lost material volume as well as the volume lost specifically by abrasive wear, highlighting the complexity of machining in the wood industry. The results underscore the significance of coatings to enhance the wear resistance of knives. However, the presence of material tear-outs on some coated knives suggests potential fragility under challenging machining conditions.

Additionally, an abrasion wear testing machine with a rubber wheel present at DK-Spec, our industrial partner, has been refurbished, thus enabling wear tests according to the ASTM G65 standard. Moreover, an analysis in accordance with the ASTM G65 standard was conducted to evaluate the abrasive wear resistance of the steels. The results indicate that the coated steel A8mod+1%W offers the best resistance among the coated steels, with a wear reduction of 49%. In contrast, although steel W360 demonstrated excellent intrinsic resistance, the coating did not yield a significant improvement for this steel.

This thesis, through its meticulous exploration and findings, aims to contribute to a better understanding of the wear phenomena of squaring knives, and to propose optimized directions for the selection of tool steels in the wood processing industry.

Keywords: Wear Characterization, Squaring Knives, Tool Steels, Primary Wood Processing, Wear Mechanisms, ASTM G65 Standard, Wear Testing

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Généralité sur l'équarrissage du bois	7
1.1.1 Définition et objectifs de l'équarrissage	7
1.1.2 Contraintes et considérations lors de l'équarrissage du bois	8
1.1.3 Couteaux jetables d'équarisseuses	9
1.1.4 Caractéristiques du bois	11
1.2 Généralités sur les mécanismes d'usure	13
1.2.1 Usure par abrasion	13
1.2.2 Usure par adhésion	14
1.2.3 Usure par fatigue	15
1.2.4 Usure par corrosion	17
1.2.5 Usure dans l'industrie du bois	18
1.3 Manifestation de l'usure des arêtes de coupe	19
1.4 Facteurs d'influences de l'usure des aciers à outils	20
1.5 Techniques d'évaluation de l'usure	22
1.5.1 Inspection visuelle	23
1.5.2 Mesure de l'usure de l'outil	23
1.5.3 Quantification de l'usure	24
1.6 Influence des éléments d'alliage et la microstructure sur les propriétés des aciers à outils	26
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODE	29
2.1 Aciers à outils pour la caractérisation	29
2.2 Méthodologie de quantification de l'usure	29
2.2.1 Présentation de l'approche proposée	29
2.2.2 Système de mesure 3D sans contact	31
2.2.3 Support pour couteaux et poudre de numérisation	32
2.2.4 Logiciels utilisés pour le traitement des données	33
2.3 Analyse des mécanismes d'usure	33
2.4 Évaluation des propriétés mécaniques d'usure	34
2.4.1 Présentation de la machine de test d'usure utilisée	34
2.4.2 Comparaison des paramètres	35
CHAPITRE 3 ETUDE DES MECANISMES D'USURE	39
3.1 Analyse des caractéristiques des aciers à outils	39
3.1.1 Composition chimique	39
3.1.2 Microstructure	40
3.1.3 Dureté	45
3.2 Mécanismes d'usure et d'endommagement des aciers à outils	46

3.2.1	Acier A8 mod +1%W	47
3.2.2	Acier A8 mod +0%W	48
3.2.3	Acier W360	48
3.3	Défaillances liées à l'usure des aciers à outils de l'expérience	49
3.4	Discussion des résultats	51
3.4.1	Effet de la Composition chimique	52
3.4.2	Effet du Revêtement	53
CHAPITRE 4 ÉVALUATION DE L'USURE DES ACIERS À OUTILS POUR L'USINAGE DU BOIS		55
4.1	Introduction.....	55
4.2	Description des étapes de quantification de l'usure.....	55
4.2.1	Étape 1 : Numérisation des couteaux avant usure	55
4.2.2	Étape 2 : Numérisation des couteaux après usure.....	56
4.2.3	Étape 3 : Quantification de l'usure	56
4.3	Étude de l'usure des outils en fonction du temps : Étude de cas.....	58
4.3.1	Description de l'étude expérimentale	58
4.3.2	Quantification du volume perdu par usure.....	60
4.3.3	Mesure du profil.....	60
4.3.4	Volume de matière perdu.....	62
4.3.5	Volume perdu par usure en excluant les écaillages	63
4.4	Évaluation de l'usure pour trois aciers à outils spécifiques	66
4.4.1	Aciers à outils de l'expérience	66
4.4.2	Protocole expérimental	66
4.4.3	Mesure et évaluation de l'usure pour chaque acier	67
4.4.4	Acier A8 mod +1%W	68
4.4.5	Acier A8 mod +0%W	69
4.4.6	Acier W360	71
4.4.7	Analyse comparative des résultats	72
4.5	Analyse statistique	74
4.5.1	Définitions des hypothèses	75
4.5.2	Analyse de la Variance (ANOVA)	76
4.6	Discussion des résultats	77
4.7	Conclusion	79
CHAPITRE 5 ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES D'USURE ABRASIVE.....		81
5.1	Introduction.....	81
5.2	Résultats des tests d'usure	81
5.2.1	Acier A8 mod+0% W	82
5.2.2	Acier A8 mod+1% W	85
5.2.3	Acier W360	87
5.3	Quantification de l'usure	90
5.3.1	Mesure de volume.....	90
5.3.2	Mesure du profil.....	91

5.4	Discussion des résultats	93
5.5	Conclusion	95
	CONCLUSION	97
	RECOMMANDATIONS	99
ANNEXE I	RESULTATS DE LA NUMERISATION DES COUTEAUX A8 MOD +1%W EN FONCTION DU TEMPS.....	101
ANNEXE II	RESULTATS DE LA NUMERISATION DES COUTEAUX EN FONCTION DU TYPE D'ACIER	105
ANNEXE III	RESULTATS DES VOLUMES PERDUS EN FONCTION DU TYPE D'ACIER	111
ANNEXE IV	RESULTATS DES TESTS D'USURE	113
ANNEXE V	ANALYSE STATISTIQUE : ANALYSE DE LA VARIANCE	125
ANNEXE VI	TABLE STATISTIQUE DE FISHER	129
ANNEXE VII	A NEW APPROACH FOR QUANTIFYING WEAR OF CUTTING TOOLS FOR WOOD MACHINING	131
ANNEXE VIII	WEAR RESISTANCE EVALUATION OF THREE TOOL STEELS IN PRIMARY WOOD PROCESSING: A COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL OBSERVATIONS AND LITERARY PREDICTIONS.....	161
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	201

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1	Classification AISI et composition nominale de certains aciers à outils ...11
Tableau 1-2	Effet de certains éléments d'alliages dans l'acier rapide .....27
Tableau 2-1	Différents aciers étudiés.....29
Tableau 2-2	Comparatif des paramètres de l'appareil d'essai d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec .....36
Tableau 2-3	Paramètres du test d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec.....37
Tableau 3-1	Composition chimique des aciers à outils soumis à notre étude.....40
Tableau 3-2	Récapitulatif des résultats obtenus à partir de l'analyse microstructurale..44
Tableau 3-3	Dureté de Rockwell en fonction du type d'acier .....46
Tableau 3-4	Défaillances liées à l'usure des aciers à outils de l'expérience .....51
Tableau 4-1	Identification des échantillons de couteaux .....60
Tableau 4-2	Résultats des paramètres obtenus après mesure de profil .....61
Tableau 4-3	Résultats de la mesure des volumes des arêtes de coupes .....63
Tableau 4-4	Résultats de la mesure des volumes des arêtes de coupe sur une zone spécifique .....64
Tableau 4-5	Volume perdu des aciers.....67
Tableau 4-6	Tableau de donnée pour l'ANOVA .....75
Tableau 4-7	Récapitulatif de l'analyse de la variance .....76
Tableau 4-8	Valeurs théorique de F .....77
Tableau 5-1	Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier A8mod+0%W .....84
Tableau 5-2	Résultats des tests d'usures pour l'acier A8 mod +0%W .....84
Tableau 5-3	Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier A8mod+1%W .....86

Tableau 5-4	Résultats des tests d'usures pour l'acier A8 mod +1%W	87
Tableau 5-5	Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier W360	89
Tableau 5-6	Résultats des tests d'usures pour l'acier W360.....	89
Tableau 5-7	Volumes perdus obtenus par numérisation des échantillons	90
Tableau 5-8	Mesure de profil des éprouvettes du test d'usure.....	92
Tableau 5-9	Récapitulatifs des résultats d'usure	94

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1-1	Vue d'ensemble d'une Tête d'équarrisseur	8
Figure 1-2	Schémas de la mécanique de coupe orthogonale a) Model orthogonal, b) Forces lors de la formation de copeaux lors de la coupe orthogonale	9
Figure 1-3	Couteaux jetables d'équarrisseuses.....	10
Figure 1-4	Les trois axes principaux du bois.....	12
Figure 1-5	Mécanismes d'usure par abrasion : a) microcoupe, b) rupture, c) fatigue, d) arrachement du grain	14
Figure 1-6	Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive	15
Figure 1-7	Mécanisme d'usure par fatigue	16
Figure 1-8	Usure corrosive	18
Figure 1-9	Paramètres d'usure selon la norme ISO 3685	20
Figure 1-10	Facteurs entraînant l'usure de l'outil de coupe	22
Figure 1-11	Paramètres géométriques d'usure de l'arête de coupe tels que considérés par McKenzie et Karovich (1975) (a), Porankiewicz et al. (2005) (b) et Sheikh et al. (2003) (c).....	24
Figure 1-12	Schéma de principe du système de mesure d'usure d'outil	25
Figure 2-1	Schéma de la méthodologie de quantification de l'usure	30
Figure 2-2	a) Microscope Keyence, b) Présentation de l'interface de son logiciel (Laboratoire de métrologie de l'ETS).....	31
Figure 2-3	a) Poudre de Numérisation, b) Support pour couteaux.....	32
Figure 2-4	Vue d'ensemble de la machine d'essai d'abrasion présente chez DK-SPEC	35
Figure 2-5	Appareil d'essai d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec selon la norme ASTM G65	36

Figure 3-1	Microstructure des aciers à outils a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360	40
Figure 3-2	Analyse EDX a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360	42
Figure 3-3	Diagramme de phase a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360.....	43
Figure 3-4	Dureté de Rockwell a) Trace d'indentation du cône en diamant b) A8 mod+0%W, c) A8 mod+1%W, d) W360	45
Figure 3-5	Couteaux usés a) avec revêtement et b) sans revêtement	46
Figure 3-6	Mécanismes d'endommagement pour l'acier A8 mod+ 1%W	47
Figure 3-7	Mécanismes d'endommagement pour l'acier A8 mod+ 0%W	48
Figure 3-8	Mécanismes d'endommagement pour l'acier W360.....	49
Figure 3-9	Mécanismes d'usure a) A8 mod+1%W b) A8 mod+0%W c) W360	50
Figure 4-1	a) Numérisation du tranchant initial, b) Numérisation du tranchant après usure.....	56
Figure 4-2	Paramètres de mesure du profil d'arête : α- angle de pointe d'outil, β- angle d'arête de coupe, KT-profondeur d'usure, b- largeur d'usure.....	58
Figure 4-3	Mesure du profil.....	61
Figure 4-4	Computation de l'arête avec Matlab. a) avant usure b) après usure	62
Figure 4-5	Zone spécifique délimitée pour l'estimation du volume perdu	64
Figure 4-6	Usure des couteaux d'équarrisseuses en fonction du temps a) couteaux revêtus, b) couteaux non revêtus	65
Figure 4-7	Comparaison de l'usure des couteaux revêtus et non revêtus	65
Figure 4-8	Couteaux usés pour l'acier A8 mod + 1%W a) revêtus et b) non revêtus	68
Figure 4-9	Volume perdu pour le A8 mod + 1%W a) Volume de matière perdu et b) Volume perdu par usure.....	69
Figure 4-10	Couteaux usés pour l'acier A8 mod + 0%W a) revêtus et b) non revêtus	70

Figure 4-11	Volume perdu pour le A8 mod + 0%W a) Volume de matière perdu et b) Volume perdu par usure.....	70
Figure 4-12	Couteaux usés pour l'acier W360 a) revêtus et b) non revêtus	71
Figure 4-13	Volume perdu pour le W360 a) Volume de matière perdu et b) volume perdu par usure	72
Figure 4-14	Histogramme des volumes de matière perdus en fonction du type d'acier	73
Figure 4-15	Histogramme des volumes perdus par usure en fonction du type d'acier	74
Figure 5-1	Acier A8 mod+0%W revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc.....	82
Figure 5-2	Acier A8 mod+0%W non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc.....	83
Figure 5-3	Acier A8 mod+1%W revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc.....	85
Figure 5-4	Acier A8 mod+1%W non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc.....	86
Figure 5-5	Acier W360 revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc	88
Figure 5-6	Acier W360 non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc.....	88
Figure 5-7	Volumes perdus en fonction du type d'acier	91
Figure 5-8	Mesure du profil d'usure a) Échantillon, b) Profil vertical, c) Profil horizontal	92
Figure 5-9	Taux d'usure en fonction du type d'acier	94

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	3 dimensions
A8mod+0%W	A8 modifié contenant zéro pour cent de tungstène
A8mod+1%W	A8 modifié contenant un pour cent de tungstène
AISI	American Iron and Steel Institute (Institut américain du fer et de l'acier)
ASTM	American Standards of Technical Material
C	Carbone
Co	Cobalt
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
EDX	Spectroscopie X à dispersion d'énergie
HRC	Dureté Rockwell échelle C
MATLAB	Matrix laboratory
SEM (MEB)	Scanning Electron Microscopy (microscopie électronique à balayage)
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
N	Azote
Nb	Niobium
Ni	Nickel
Si	Silicium
STL	Standard Triangle Language
Temp. Diss.	Température de dissolution
V	Vanadium
VER	Volume edge recession (volume du retrait de bord)

V1	Version 1
V1.1	Échantillon 1 de la Version 1
V1.1.28H	Échantillon 1 de la Version 1 ayant travaillé 28 heures
V2	Version 2
V2.1	Échantillon 1 de la Version 2
V2.1.56H	Échantillon 1 de la Version 2 ayant travaillé 56 heures
W	Tungstène

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	Millimètre
mm^3	Millimètre cube
g	Gramme
mg/m	Milligramme par mètre
g/cm^3	Gramme par centimètre cube
α	Alpha
β	Bêta
γ	Gamma
φ	Phi
$^\circ$	Degré
$\%$	Pour cent
$^\circ C$	Degré Celsius
N	Newton
h	Heure
g/min	Gramme par minute
rpm	Rotation par minute
μm	Micromètre

INTRODUCTION

Les forêts représentent une ressource cruciale pour le Canada, apportant une variété de bénéfices sur les plans économique, social et écologique. En 2013, le secteur forestier a injecté 19,8 milliards de dollars dans l'économie, soit 1,25% du PIB réel du Canada (Ressources naturelles Canada, 2022).

Chaque année, un volume significatif de bois, se chiffrant en millions de mètres cubes, est récolté au Canada pour diverses applications, et cette industrie emploie plus de 240,000 personnes à travers le pays. Le volume total de la récolte industrielle de bois rond a connu une apogée en 2004 avec 208 millions de mètres cubes, puis a subi une baisse marquée pour atteindre 116 millions de mètres cubes en 2009, avant de remonter à 141 millions de mètres cubes en 2020 (*Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement: durabilité de la récolte de bois d'œuvre*, 2022).

La filière bois s'articule généralement autour de trois niveaux de transformation, indépendamment du nombre d'étapes impliquées dans la transformation du produit. Le premier niveau de transformation, qui sera le point focal de notre étude, englobe toutes les opérations directement effectuées sur les bois ronds afin d'obtenir un produit différent. Les produits résultant de cette première transformation incluent par exemple les équarris, les avivés bruts, les plots, les placages tranchés ou déroulés, les bois fendus, les plaquettes, les sciures, les copeaux, la pâte à papier, le bois de feu, et le charbon de bois (Margerie, 1976), (ATIBT, 2016).

La majorité de la coupe du bois est réalisée grâce à des outils de coupe conçus à partir d'acières spéciaux, possédant des géométries et des traitements thermiques distincts. Ces outils de coupe, employés dans l'industrie de la coupe du bois, sont fabriqués à partir d'acières à haute résistance mécanique, avec des duretés excédant 50HRC, et contiennent une grande fraction volumique de carbures. Pour atteindre leur forme finale, ces outils subissent des processus d'usinage.

Bien que composés de matériaux hautement résistants à l'usure, la dégradation et la résistance des outils de coupe restent des défis majeurs dans l'industrie du bois. Ces facteurs influencent directement la qualité du produit et les coûts de production. L'utilisation de couteaux émoussés pour travailler le bois se traduit par une qualité de surface inférieure, prolongeant ainsi le temps nécessaire pour le processus de finition final. De plus, les interruptions nécessaires pour remplacer les couteaux usés sont significatives et accroissent les coûts de production. Toute stratégie visant à réduire ces temps d'arrêt peut augmenter favorablement le taux de production (Heidari, 2019), (Aknouche et al., 2009), (Bayer & Becherer, 1989). Nombre d'études ont été menées sur l'optimisation des paramètres d'usinage afin de minimiser l'usure des outils de coupe dans la transformation du bois, en explorant des paramètres clés tels que l'angle de coupe, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (Ameur, Assas, & Mazouz, 2007), (BOUZID, 2015), (Nasnas, 2021), (Kant & Sangwan, 2014), (Ribeiro, César, & Lopes, 2017).

L'usure des outils conduit à une diminution notable de la productivité et à une augmentation des coûts de consommation, tout en dégradant la qualité du produit final, comme le souligne abondamment la littérature. Cependant, peu d'études ont spécifiquement examiné les aciers à outil, et leur comportement face à l'usure dans ce contexte. L'impact de l'usure sur ces matériaux, et les répercussions subséquentes sur la qualité du produit final et les coûts de production, demeurent des domaines peu explorés, ouvrant ainsi un champ d'investigation important pour une meilleure compréhension et optimisation des processus d'usinage dans l'industrie du bois (Lau, Mei, Yeung, & Man, 2000), (Achour, 2006), (Nati, Spinelli, & Fabbri, 2010). Il est démontré que la microstructure des alliages peut significativement affecter la durée de vie des outils de coupe ainsi que la qualité de la pièce produite (Bourithis & Papadimitriou, 2009), (da Silva, Scheuer, & D'Oliveira, 2019).

Problématique

La problématique du mémoire pourrait être formulée ainsi : Dans l'industrie du bois, les couteaux d'équarrissage en acier de haute résistance, avec une dureté dépassant 50 HRC, sont confrontés à des défis significatifs, principalement en termes de dégradation et d'usure prématuée. Cette usure, affectant directement la qualité du produit final et les coûts de production, est influencée par divers paramètres, dont la microstructure de l'outil de coupe (revêtement, type d'alliage et traitement thermique). Cependant, l'impact précis du revêtement et de la composition chimique sur l'usure de ces matériaux reste peu exploré. Ce manque de connaissances ouvre un champ d'investigation crucial pour mieux comprendre et potentiellement améliorer la longévité et l'efficacité des outils dans ce secteur. Ainsi, la problématique centrale de ce mémoire est d'explorer et de comprendre l'influence de la microstructure, du revêtement, et de la composition chimique sur la résistance à l'usure des couteaux d'équarrissage en acier utilisés dans l'industrie du bois.

Objectifs de l'étude

Ce rapport vise à synthétiser les études détaillées sur la métallurgie des aciers outils employés dans l'industrie de la transformation du bois, et à dresser la liste des enjeux techniques et scientifiques qui nécessitent d'être abordés pour minimiser l'usure des composants et améliorer la qualité des outils. Dans la perspective de caractériser l'usure des couteaux jetables d'équarrisseur dans ce secteur, les objectifs suivants ont été définis :

1. Identifier les causes principales de l'usure et cerner les facteurs possibles influant sur la résistance à l'usure.
2. Élaborer une méthodologie pour quantifier l'usure, et l'évaluer en fonction des conditions opérationnelles comparativement aux normes des tests mécaniques.
3. Mettre en comparaison les performances des aciers à outils selon les spécifications DK-SPEC en termes de résistance à l'usure abrasive, et identifier le matériau présentant les meilleures propriétés, tout en justifiant les motifs de sa supériorité.

Intérêt de la recherche

Cette étude vise à utiliser une approche tridimensionnelle (3D) pour la quantification de l'usure, en contraste avec l'approche bidimensionnelle (2D) couramment. Les deux approches sont présentées à la Figure 0-1.

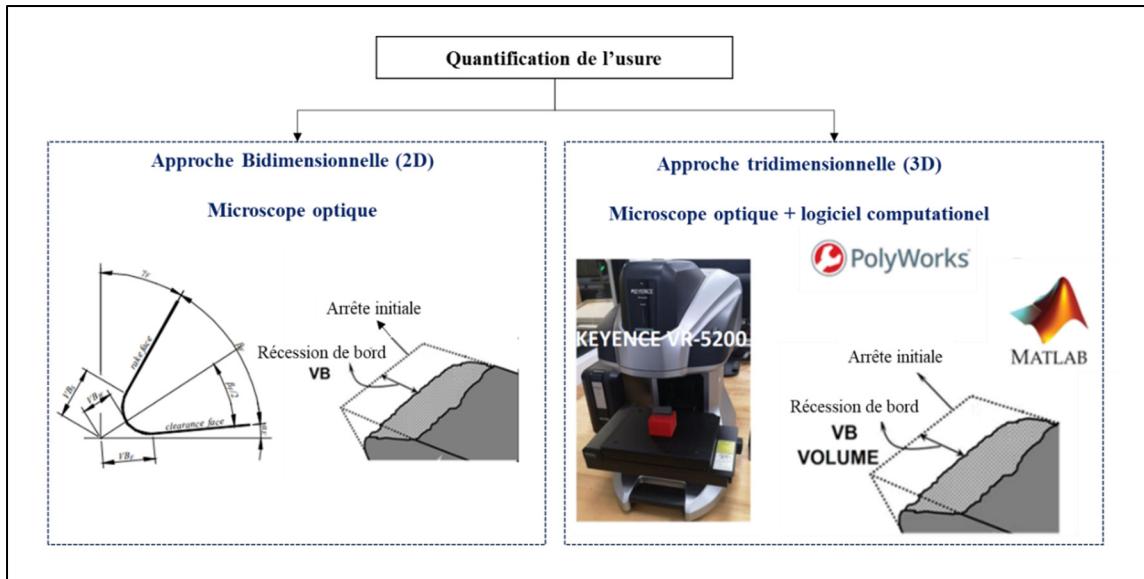


Figure 0-1 Approches pour la quantification de l'usure

Ainsi, ce mémoire est structuré en cinq chapitres distincts. Le Chapitre 1 propose une revue de littérature, abordant les fondements, les mécanismes en jeu, ainsi que l'importance de la caractérisation de l'usure des couteaux d'équarrisseur, en mettant en lumière les travaux antérieurs pertinents dans ce domaine. Le Chapitre 2 décrit le matériel et la méthode employés pour mener à bien cette étude, en expliquant en détail les outils, techniques et procédures utilisées. Le Chapitre 3 est consacré à l'étude des mécanismes d'usure, en explorant les différentes causes et manifestations de l'usure, ainsi que leur impact sur la performance des couteaux d'équarrisseur. Le Chapitre 4, intitulé "Évaluation de l'usure des aciers à outils pour l'usinage du bois", applique la méthodologie développée pour évaluer l'usure des différents aciers à outils, en mettant en avant les découvertes cruciales obtenues. Le Chapitre 5 traite de l'évaluation des propriétés mécaniques d'usure abrasive, en mettant un accent particulier sur l'analyse des résultats obtenus et leur interprétation en termes de performances des aciers à

outils. En conclusion, une synthèse générale des résultats majeures est présentée, suivie de recommandations qui pourraient alimenter des idées pour de futures recherches dans ce domaine spécifique. Ce format permet une exploration exhaustive et structurée de la problématique centrale de la caractérisation de l'usure des couteaux d'équarrisseur, tout en offrant des orientations précieuses pour des travaux de recherche subséquents.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La caractérisation en métallurgie fait référence à un ensemble de techniques et de procédures utilisées pour évaluer, analyser et décrire les propriétés, la structure, la composition, le comportement et la performance des matériaux métalliques. Ces informations sont essentielles pour comprendre les propriétés des matériaux, prédire leur comportement dans des conditions de service et optimiser les processus de fabrication (Seetharaman, 2005).

1.1 Généralité sur l'équarrissage du bois

1.1.1 Définition et objectifs de l'équarrissage

La tête d'équarrisseuse encore appelée "chipper canter" est une machine conçue pour transformer de manière efficace et rapide de grandes grumes ou des planches en copeaux de bois et en planches de bois "canter", ce qui en fait un outil précieux dans l'industrie du bois et de la transformation du bois. Le processus consiste à introduire les grumes ou les planches dans le "chipper canter", qui utilise ensuite des outils de coupe tranchants pour débiter le matériau en morceaux plus petits (Hernandez & Quirion, 1993), (Hernandez & Lessard, 1997).

Les copeaux de bois résultants peuvent être utilisés à diverses fins, comme la production de papier, de panneaux de particules ou comme combustible pour l'énergie biomasse. Quant aux planches de bois "canter", ce sont des pièces de bois minces et rectangulaires qui peuvent être encore transformées ou utilisées dans diverses applications de menuiserie (Walker, 2006).

Différentes versions et divers designs de chipper-canters sont disponibles, chacun étant conçu selon les critères du fabricant et les conditions d'utilisation envisagées. DK-SPEC, le partenaire industriel de cette recherche, offre une variété de têtes pour ces machines.

La Figure 1-1 présente les diverses une vue d'ensemble de la tête d'équarisseuse et des couteaux correspondants, comme indiqué dans la référence (« DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseuses », 2023).

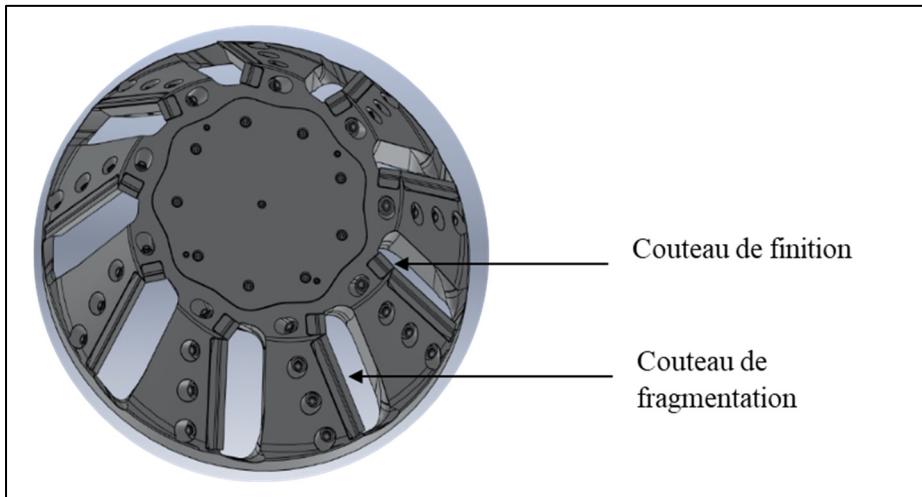


Figure 1-1 Vue d'ensemble d'une Tête d'équarrisseur
Tirée de « DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseuses » (2023)

1.1.2 Contraintes et considérations lors de l'équarrissage du bois

Les équarisseuses se caractérisent par leur adaptabilité, présentant généralement deux têtes de porte-couteaux avec 6 à 9 ensembles. Chaque ensemble intègre un couteau plus court pour une finition soignée et précise de la surface des équarris, et un couteau plus long destiné à fendre les copeaux et traiter les parties les plus robustes du bois. Cette combinaison d'outils assure une conversion optimale du bois brut en pièces finies de haute qualité.

Durant le processus d'équarrissage, les contraintes exercées entraînent majoritairement une incision longitudinale. L'utilisation d'une tête d'équarisseuse pour transformer les bûches implique généralement une coupe orthogonale. La Figure 1-2 présente les schémas de la mécanique de coupe orthogonale avec les paramètres suivants : t , épaisseur du copeau non coupé (avance ou profondeur de coupe); tc , épaisseur du copeau; ϕ , angle de cisaillement; α , angle d'inclinaison arrière; γ , angle de dépouille; θ , angle de l'arête [$= 90 - (\alpha + \gamma)$]; F , force

de frottement; N , normale à la force de frottement; F_s , force de cisaillement; F_n , normale à la force de cisaillement; F_c , force de coupe; F_t , force tangentielle; R , force résultante (Black, 1989).

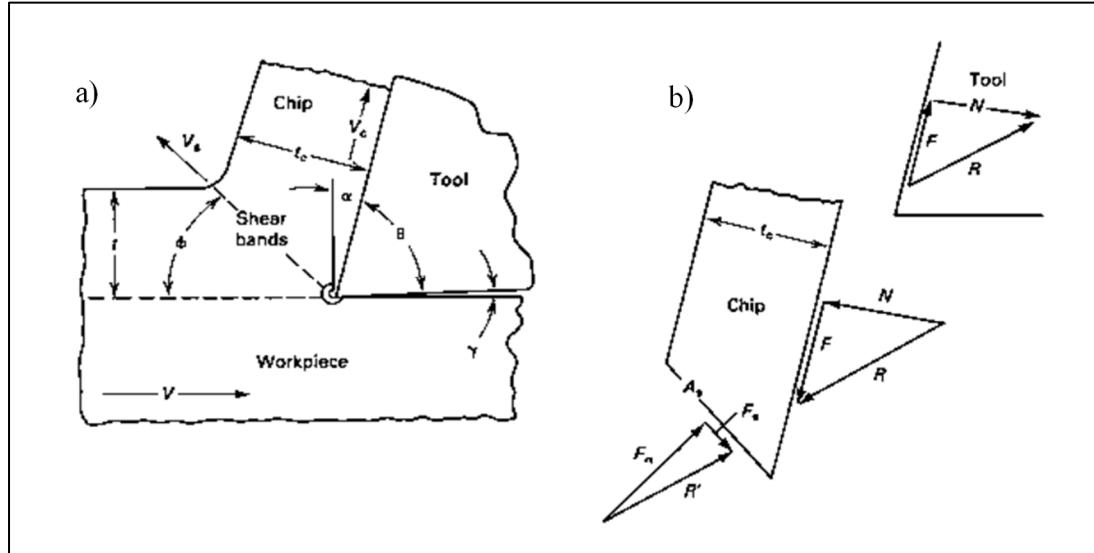


Figure 1-2 Schémas de la mécanique de coupe orthogonale
 a) Model orthogonal,
 b) Forces lors de la formation de copeaux lors de la coupe orthogonale
 Tirée de Black (1989)

1.1.3 Couteaux jetables d'équarrisseuses

Les Couteaux jetables d'équarrisseuses sont des couteaux spécialement conçus pour les machines d'équarrissage, qui sont utilisés pour transformer les bûches en équarris. Ces couteaux sont généralement conçus pour être utilisés pendant une période limitée et sont remplacés une fois qu'ils sont usés ou émoussés, d'où le terme "jetables". DK-Spec, le collaborateur industriel de cette recherche, propose une gamme variée de ces couteaux, comme illustré dans la Figure 1-3.

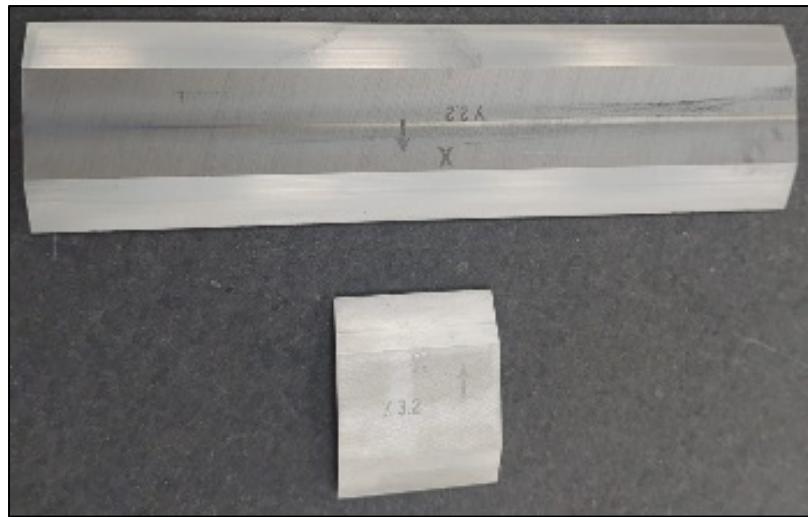


Figure 1-3 Couteaux jetables d'équarrisseuses
Tirée de « DK-SPEC portfolio outils de coupe » (2023)

Dans l'industrie du bois, les aciers à outils couramment utilisés pour la coupe appartiennent principalement aux catégories destinées au travail à froid et à haute vitesse. Ces aciers se distinguent par une teneur en carbone modérée et une présence significative d'éléments d'alliage tels que le Cr, Mo, W et Mn. La composition exacte de ces éléments influence directement leurs propriétés de durcissement lors du traitement thermique (Roberts, Kennedy, & Krauss, 1998), (Krauss, 2015). La composition chimique spécifique de chaque type d'acier est présentée en détail dans le Tableau 1-1. Les aciers à outils de cette catégorie d'aciers sont les matériaux privilégiés pour la confection des couteaux d'équarrisseurs par DK-SPEC.

Tableau 1-1 Classification AISI et composition nominale de certains aciers à outils
Tiré de Roberts et al (1998)

AISI	UNS No.	Identifying elements, %								
		C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
Air-hardening, medium-alloy cold-work tool steels										
A2	T30102	1.00	...	...	5.00	...	...	1.00	...	...
A3	T30103	1.25	...	...	5.00	1.00	...	1.00	...	...
A4	T30104	1.00	2.00	...	1.00	...	...	1.00	...	...
A6	T30106	0.70	2.00	...	1.00	...	...	1.25	...	...
A7	T30107	2.25	...	...	5.25	4.75	1.00(c)	1.00	...	...
A8	T30108	0.55	...	...	5.00	...	1.25	1.25	...	...
A9	T30109	0.50	...	...	5.00	1.00	...	1.40	...	1.50
A10(b)	T30110	1.35	1.80	1.25	...	...	...	1.50	...	1.80
Tungsten high-speed tool steels										
T1	T12001	0.75(a)	...	...	4.00	1.00	18.00	...	...	...
T2	T12002	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	...	...
T4	T12004	0.75	...	...	4.00	1.00	18.00	...	5.00	...
T5	T12005	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	8.00	...
T6	T12006	0.80	...	...	4.50	1.50	20.00	...	12.00	...
T8	T12008	0.75	...	...	4.00	2.00	14.00	...	5.00	...
T15	T12015	1.50	...	...	4.00	5.00	12.00	...	5.00	...
Molybdenum high-speed tool steels										
M1	T11301	0.80(a)	...	...	4.00	1.00	1.50	8.00	...	...
M2	T11302	0.85-1.00(a)	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	...	...
M3, class 1	T11313	1.05	...	...	4.00	2.40	6.00	5.00	...	...
M3, class 2	T11323	1.20	...	...	4.00	3.00	6.00	5.00	...	...
M4	T11304	1.30	...	...	4.00	4.00	5.50	4.50	...	...
M6	T11306	0.80	...	...	4.00	2.00	4.00	5.00	12.00	...
M7	T11307	1.00	...	...	4.00	2.00	1.75	8.75	...	...
M10	T11310	0.85-1.00(a)	...	...	4.00	2.00	...	8.00	...	...
M30	T11330	0.80	...	...	4.00	1.25	2.00	8.00	5.00	...
M33	T11333	0.90	...	...	4.00	1.15	1.50	9.50	8.00	...
M34	T11334	0.90	...	...	4.00	2.00	2.00	8.00	8.00	...
M36	T11336	0.80	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	8.00	...

1.1.4 Caractéristiques du bois

Le bois est un matériau naturel et organique, principalement constitué de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces composants sont imbriqués dans une structure cellulaire complexe qui confère au bois ses propriétés mécaniques et physiques uniques. La cellulose est le principal polysaccharide du bois et fournit la résistance mécanique. L'hémicellulose est un polysaccharide de poids moléculaire inférieur qui remplit les espaces entre les molécules de cellulose. La lignine est un polymère complexe qui agit comme une matrice, liant les fibres de cellulose et conférant au bois sa rigidité. Outre ces trois composants principaux, le bois contient également des extraits tels que des résines, des huiles, des tanins et d'autres composés qui

peuvent influencer ses propriétés (Sassus, Almérás, Gril, & Yamamoto, 2005), (Xie, Fu, Wang, Xiao, & Militz, 2013).

Contrairement à de nombreux autres matériaux, le bois n'est pas isotrope. Cela signifie que ses propriétés varient en fonction de la direction dans laquelle elles sont mesurées. Cette anisotropie est due à la structure cellulaire du bois, où les fibres sont principalement orientées dans le sens de la croissance de l'arbre (Mäkinen, Halonen, Koivisto, & Alava, 2022), (Kretschmann, 2010). Ainsi, les propriétés du bois peuvent différer radialement, tangentiellement et longitudinalement comme le présente la Figure 1-4.

Lors de la transformation du bois en équarris, il est essentiel de tenir compte de cette nature anisotrope. Les forces appliquées lors de la coupe peuvent interagir différemment avec les fibres du bois, influençant ainsi la qualité et l'efficacité de la coupe. La direction de coupe par rapport à l'orientation des fibres peut affecter la formation de copeaux, la rugosité de la surface coupée et la durabilité de l'outil de coupe (Czibula, Seidlhofer, Ganser, Hirn, & Teichert, 2021).

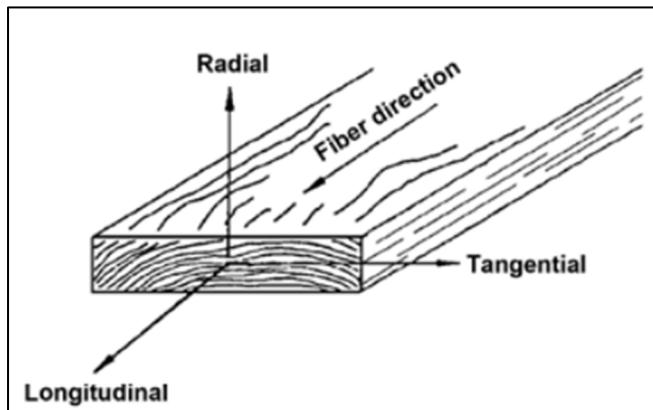


Figure 1-4 Les trois axes principaux du bois
Tirée de Kretschmann (2010)

1.2 Généralités sur les mécanismes d'usure

L'usure, un phénomène omniprésent dans de nombreux domaines industriels et scientifiques, est un sujet d'étude crucial pour comprendre et améliorer la durabilité et la performance des matériaux et des outils. Elle est définie comme la perte progressive de matière d'une surface, généralement causée par l'élimination ou le déplacement de matière à la suite d'une interaction mécanique avec une autre surface. Les mécanismes d'usure sont variés et peuvent être influencés par de nombreux facteurs, tels que les propriétés des matériaux en contact, les conditions environnementales, et la nature de l'interaction entre les surfaces (Koji Kato & Adachi, 2000), (K. Kato, 2005), (Eyre, 1981). Les mécanismes d'usure peuvent être classés en plusieurs catégories :

1.2.1 Usure par abrasion

L'usure abrasive est l'un des mécanismes d'usure les plus courants et se produit lorsque des particules dures ou des aspérités rugueuses d'une surface glissent ou roulent sur une autre surface, entraînant l'enlèvement progressif de matière (Figure 1-5-a). Ce type d'usure est souvent comparé à l'action d'un papier de verre sur une surface, où les grains abrasifs du papier enlèvent la matière de la surface lorsqu'ils sont frottés contre elle. Les facteurs tels que la dureté relative des deux surfaces, la charge appliquée et la présence de particules abrasives dans l'environnement peuvent influencer la gravité et la vitesse de cette usure (Kovaříková, Szewczyková, Blaškoviš, Hodúlová, & Lechovič, 2009), (Pooley & Tabor, 1972), (Murray, Mutton, & Watson, 1982).

Ce type d'usure est couramment observé dans les systèmes tribologiques où les éléments en contact présentent des écarts significatifs de dureté. Dans ce contexte, le matériau le plus dur agit comme un agent abrasif, ses particules ou aspérités pénétrant la surface du matériau plus tendre (Figure 1-5-b). Sous l'effet du mouvement relatif, des sillons et des éraflures apparaissent (Figure 1-5-c). Dans des conditions plus sévères, des morceaux de matériau peuvent même se détacher, entraînant une usure importante (Figure 1-5-d). Selon (Mang et al.,

2011), lorsqu'une particule traverse la zone de contact, elle peut provoquer une élimination de matière selon quatre mécanismes distincts, comme décrit par (Cayer-Barrioz, 2003).

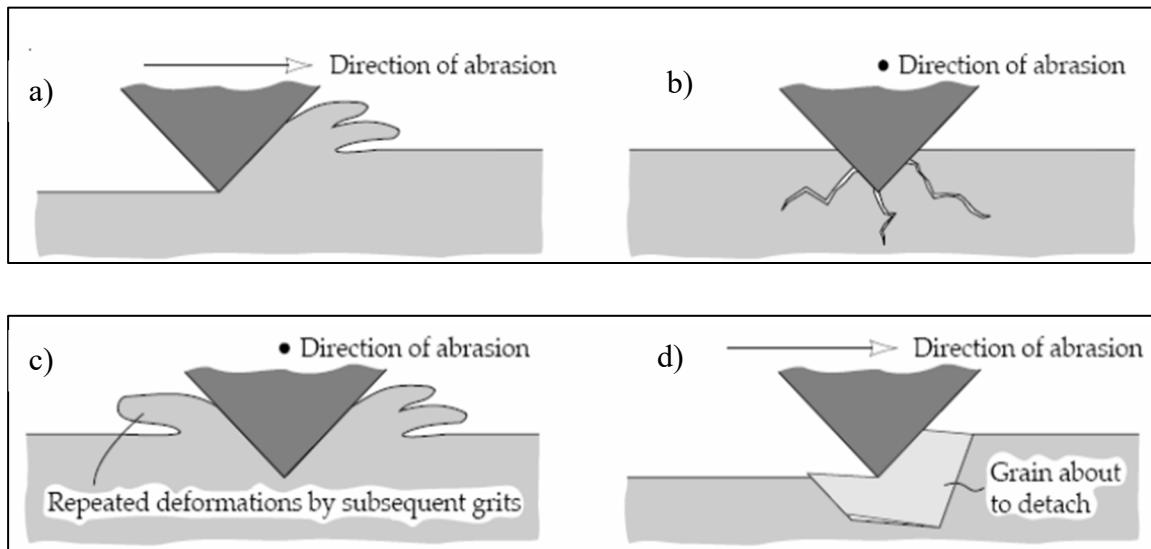


Figure 1-5 Mécanismes d'usure par abrasion : a) microcoupe, b) rupture, c) fatigue, d) arrachement du grain
Tirée de Kovaříková et al (2009)

Dans de nombreux contextes industriels, l'usure abrasive peut entraîner une réduction significative de la durée de vie des composants et nécessiter des remplacements fréquents, ce qui peut être coûteux en termes de temps et de ressources.

1.2.2 Usure par adhésion

L'usure adhésive est un processus complexe observé principalement lors de l'interaction glissante de matériaux de duretés comparables, accentué par la présence de forces adhésives élevées. Elle se manifeste par des phénomènes de soudage entre les aspérités des surfaces en friction, conduisant à d'importantes déformations plastiques. À l'échelle microscopique, cette usure est gouvernée par des interactions physico-chimiques, où des liaisons, qu'elles soient intermoléculaires ou interatomiques, se forment à l'interface. Ces interactions peuvent provoquer un transfert de matière d'une surface à l'autre, par des mécanismes mécaniques ou à la suite de réactions chimiques. Les microaspérités, en réduisant la surface de contact réelle,

génèrent des points de haute énergie favorisant ces réactions. Les conséquences typiques de l'usure adhésive incluent le transfert de matière (Figure 1-6), les piqûres dues à la corrosion, l'apparition de crêtes et le phénomène d'écaillage, comme le montrent diverses études (Aghababaei, Warner, & Molinari, 2016), (DJAFRI, 2015), (Brink & Molinari, 2019), (Affatato & Brando, 2013).

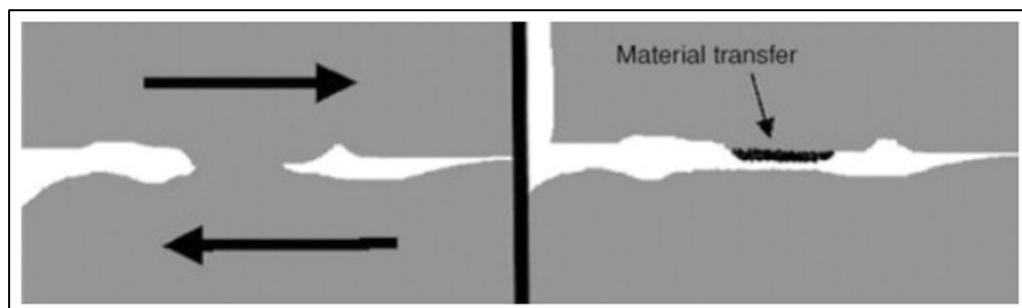


Figure 1-6 Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive
Tirée de Affatato & Brando (2013)

1.2.3 Usure par fatigue

L'usure par fatigue est un type d'usure qui se produit lorsque les matériaux sont soumis à des contraintes répétitives ou alternées, souvent en raison d'interactions telles que le glissement, le roulement ou la vibration. Ces contraintes répétées peuvent entraîner des déformations cycliques dans les couches superficielles du matériau, ce qui peut initier des fissures ou des microfissures (Ionescu, 2012).

Le processus d'usure par fatigue se déroule généralement en plusieurs étapes :

- Initiation de la fissure : Les contraintes répétées provoquent l'amorçage de microfissures à la surface ou juste en dessous de la surface du matériau. Ces points d'initiation sont souvent localisés dans des zones où la contrainte est maximale ou à des endroits avec des défauts microscopiques.

- Propagation de la fissure : Une fois initiées, ces fissures commencent à se propager sous l'effet des cycles de contrainte. La direction de propagation est généralement perpendiculaire à la direction de la contrainte maximale.
- Formation de particules d'usure : À mesure que les fissures se propagent, des morceaux de matériau peuvent se détacher, formant des particules d'usure. Ces particules peuvent alors être éliminées de la surface, entraînant une perte de matière.

Les manifestations courantes de l'usure par fatigue comprennent des piqûres, des fissures, de l'écaillage et, dans les cas avancés, des défaillances catastrophiques du matériau ou de la pièce (Stachowiak & Batchelor, 2014). La Figure 1-7 présente en détail les étapes du processus d'usure par fatigue.

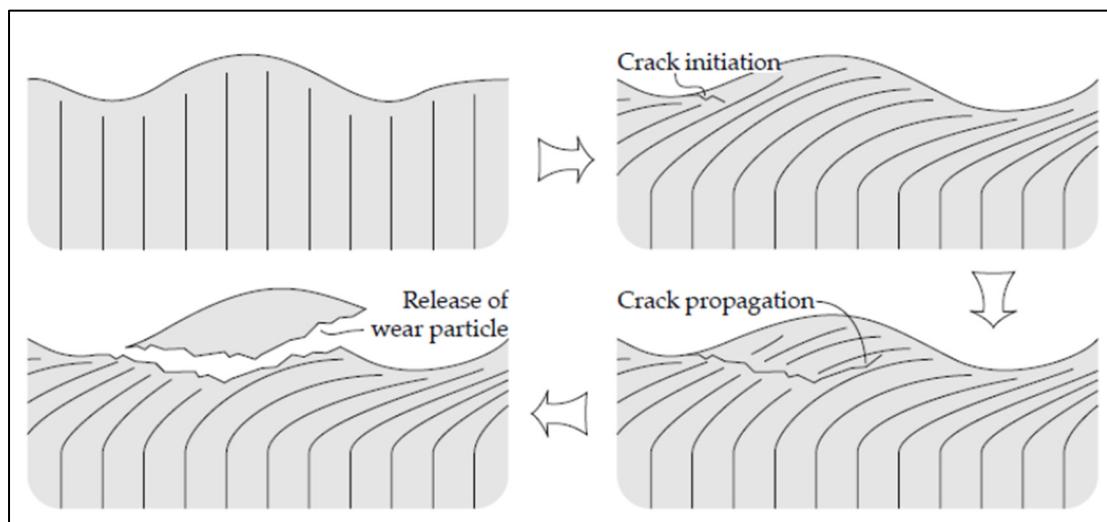


Figure 1-7 Mécanisme d'usure par fatigue
Tirée de Stachowiak & Batchelor (2014)

1.2.4 Usure par corrosion

L'usure corrosive est un phénomène complexe qui combine les effets de l'usure mécanique et de la corrosion chimique ou électrochimique. Dans ce type d'usure, la perte de matériau est non seulement due à l'action mécanique, comme le frottement, mais aussi à des réactions chimiques qui se produisent à la surface du matériau comme le présente Figure 1-8. Ces réactions peuvent être accélérées par des facteurs tels que la présence d'humidité, d'oxygène ou d'autres agents corrosifs (He, Fang, & Jin, 2014).

L'endommagement dans le cas de l'usure corrosive est principalement dominé par des réactions chimiques. Les produits de ces réactions, souvent sous forme de composés oxydés ou d'autres produits de corrosion, se forment à la surface du matériau. Cependant, ces produits ne restent pas toujours en place. L'action mécanique, comme le frottement ou le glissement, peut enlever ces produits de corrosion, exposant ainsi de nouvelles zones du matériau à la corrosion (Dearnley & Aldrich-Smith, 2004), (Komotori, Hisamori, & Ohmori, 2007).

Un aspect distinctif de l'usure corrosive est la formation de films interfaciaux compactés. Ces films peuvent agir comme des barrières protectrices, ralentissant la progression de la corrosion. Cependant, s'ils sont enlevés par usure mécanique, le matériau sous-jacent est à nouveau exposé à l'environnement corrosif. Les manifestations typiques de l'usure corrosive comprennent la formation de produits de réaction, tels que des particules ou des couches. Ces produits peuvent s'accumuler sur la surface ou être emportés, entraînant une perte progressive de matériau et une dégradation de la performance du composant (Mair, Stolarski, Vowles, & Lloyd, 1996).

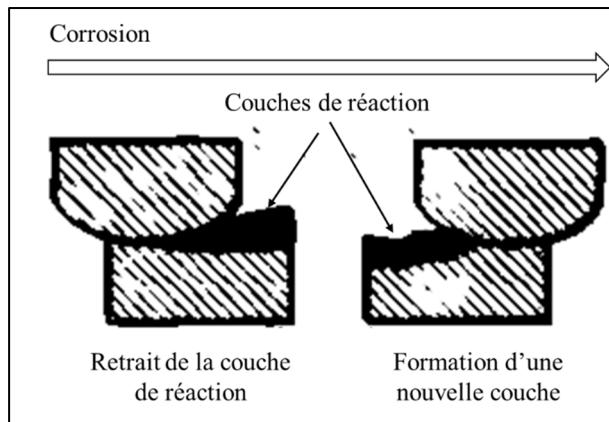


Figure 1-8 Usure corrosive
Tirée de Mair et al (1996)

1.2.5 Usure dans l'industrie du bois

Les problèmes majeurs rencontrés dans l'industrie du bois comprennent l'usure prématuée, qui est principalement causée par la ductilité, la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure du matériau en acier, ainsi que la fissuration/fracture, qui survient en raison de chocs provoqués par des corps étrangers tels que des clous, des billes, des pierres, etc. (C. Labidi et al., 2005). Dans le secteur industriel du bois, divers mécanismes d'usure peuvent être observés, tels que l'abrasion, l'écaillage, la fissuration, et la déformation. Selon Heidari, (2019), le mécanisme d'usure prédominant dans ce contexte est l'usure abrasive.

Bayoumi, Bailey, & Stewart, (1983) ont mené une recherche approfondie sur l'usure des outils de coupe en carbure de tungstène cémenté lors de l'usinage du bois, en particulier du bois vert à haute teneur en humidité. Contrairement aux mécanismes d'usure traditionnellement supposés, tels que l'ébréchage du bord de l'outil, l'abrasion et l'attaque électrochimique, les auteurs ont identifié un nouveau processus d'usure qui implique principalement l'arrondissement progressif du nez de l'outil. Ce phénomène est attribué à une réaction chimique entre le liant (cobalt) de l'outil et les extractibles (tanins) présents dans le bois, conduisant à la perte des grains de carbure de tungstène lorsque la liaison ne peut plus résister aux forces de cisaillement générées pendant la coupe. Cette étude offre une compréhension

novatrice du mécanisme spécifique d'usure des outils de coupe en bois, qui se distingue nettement des mécanismes d'usure rencontrés lors de l'usinage des métaux.

De plus, les résultats de l'étude montrent que l'usure dépend du type et de la quantité de liant présents dans le carbure cémenté, ainsi que de la nature de l'environnement. Les matériaux avec des liants Co-Cr et Ni-Cr contenant des quantités importantes de chrome ont démontré la plus grande résistance à l'usure (Bayoumi et al., 1983)

1.3 Manifestation de l'usure des arêtes de coupe

Pendant le processus de coupe, on observe couramment deux manifestations de l'usure des arêtes de coupe : l'usure sur la face de coupe et l'usure en dépouille.

- Usure sur la face de coupe : L'usure sur la face de coupe se produit lorsque le matériau de l'outil est érodé ou détérioré au niveau de la surface qui entre directement en contact avec la pièce à usiner. Ce type d'usure peut être causé par le frottement, les forces de coupe et les températures élevées générées pendant le processus d'usinage. Au fil du temps, cette usure diminue la netteté et la précision de l'arête de coupe, ce qui peut entraîner une diminution de la qualité de la surface usinée et des forces de coupe supplémentaires (Barrow, 1972).
- Usure en dépouille : L'usure en dépouille se produit le long de la face latérale de l'outil, connue sous le nom de dépouille. L'usure en dépouille peut être provoquée par des forces de cisaillement et de frottement exercées sur les flancs de l'outil pendant le processus de coupe. Cette usure peut entraîner un affaiblissement de la structure de l'outil et une réduction de son efficacité de coupe. L'usure en dépouille peut également contribuer à la formation d'écaillages ou d'ébréchures sur les bords de l'outil (Astakhov, 2004), (Dolinšek, Šuštaršič, & Kopač, 2001).

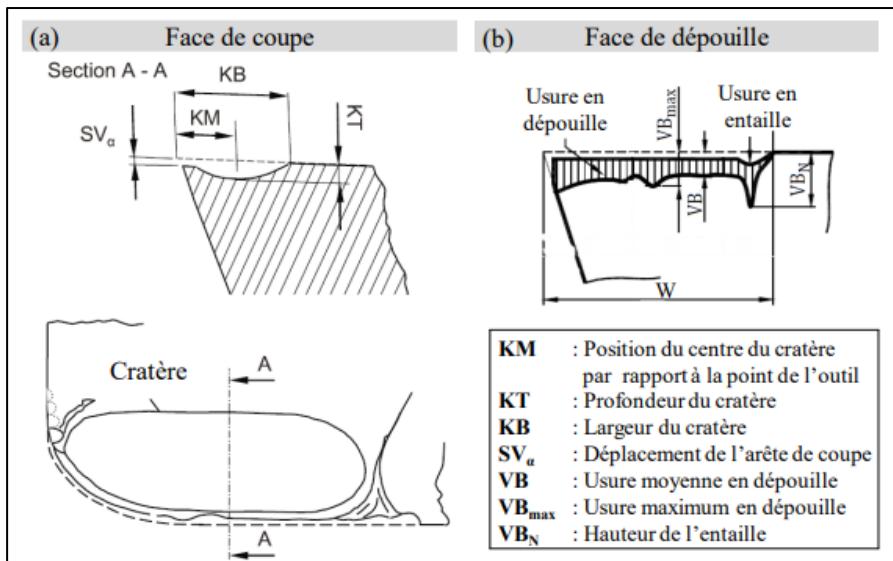


Figure 1-9 Paramètres d'usure selon la norme ISO 3685
Tirée de Bencheikh (2018)

1.4 Facteurs d'influences de l'usure des aciers à outils

L'usure des outils est déterminée par une combinaison de facteurs. Parmi ceux-ci, la conception de l'outil, sa rigidité, ainsi que celle du système machine-pièce, sont primordiales. Le positionnement correct de l'outil est vital pour garantir sa longévité, et tout écart à cet égard peut accélérer son usure. De même, le type de matériau utilisé pour fabriquer l'outil, que ce soit de l'acier rapide, de l'acier revêtu ou du carbure, influence directement sa résistance à l'usure (Kendall, 1989), (S. C. Ghosh, Hernández, & Blais, 2015).

L'usure de l'outil de coupe peut être en grande partie attribuée à sa propre géométrie, microstructure et procédé de fabrication. La géométrie de l'outil joue un rôle crucial dans la répartition des contraintes et des forces pendant le processus de coupe. Un angle de dépouille inapproprié, un rayon de l'arête de coupe trop petit ou un angle d'attaque mal ajusté peuvent entraîner des points de contrainte élevée et une usure prématuée du bord de coupe. De plus, la dureté de l'outil et sa ténacité, sont essentielles pour sa résistance aux contraintes de coupe. Une mauvaise dureté peut provoquer une déformation rapide, tandis qu'une faible ténacité peut entraîner la formation d'arêtes ébréchées ou la rupture de l'outil (Lau et al., 2000).

Le procédé de fabrication de l'outil de coupe joue également un rôle déterminant dans son usure. La qualité de l'acier utilisé et les traitements thermiques appliqués déterminent en grande partie la résistance et la stabilité de l'outil. Des imperfections ou des inclusions dans l'acier peuvent affaiblir la structure de l'outil, tandis que des traitements thermiques inadéquats peuvent compromettre sa résistance à l'usure. De plus, l'application de revêtements pour améliorer les performances de l'outil nécessite une attention particulière. Une mauvaise application ou des défauts dans les revêtements peuvent entraîner une usure prématuée et réduire l'efficacité de l'outil (Sevim & Eryurek, 2006), (Wei & Xu, 2019).

Pour prolonger la durée de vie de l'outil de coupe et améliorer ses performances, il est essentiel de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de la fabrication. Les concepteurs et les fabricants d'outils peuvent optimiser la géométrie de l'outil, choisir des matériaux appropriés et appliquer des traitements thermiques adaptés pour améliorer la résistance à l'usure. De plus, un contrôle de qualité rigoureux pendant le processus de fabrication garantit que l'outil est exempt d'imperfections et de défauts. Enfin, un entretien régulier de l'outil et une utilisation de paramètres de coupe adéquats aident à minimiser l'usure et à prolonger la durée de vie opérationnelle de l'outil de coupe (Klamecki, 1979).

Le bois, en tant que ressource à transformer, peut entraîner l'usure de l'outil de coupe en raison de ses caractéristiques particulières. Sa relative dureté et abrasivité, associée à la présence éventuelle de nœuds, d'inclusions et de variations de grain, exercent des contraintes supplémentaires sur les arêtes de coupe de l'outil, provoquant ainsi une usure prématuée. De plus, la sensibilité du bois à l'humidité peut provoquer un gonflement pendant le processus de coupe, accentuant les forces exercées sur l'outil et contribuant à son usure accélérée. La formation d'échardes lors du travail du bois ajoute également à l'usure de l'outil, rendant indispensable l'utilisation d'outils de coupe spécialement conçus pour le bois, tels que ceux en carbure de tungstène, offrant une meilleure résistance à l'abrasion (Chafik Labidi, 2006), (Klamecki, 1979), (Porankiewicz, Sandak, & Tanaka, 2005).

D'autre part, les conditions opérationnelles, notamment l'état et l'entretien de la machine-outil, ont un impact sur la durée de vie de l'outil. Les machines vieillissantes ou mal entretenues peuvent provoquer des vibrations nuisibles. L'interface outil-machine joue un rôle clé dans l'usure de l'outil de coupe en raison de plusieurs facteurs interconnectés. D'abord, le frottement de contact entre l'outil et la pièce à usiner génère de la chaleur qui peut détériorer les arêtes de coupe de l'outil. Des matériaux aux propriétés variables dans la pièce à usiner, comme la dureté et la ductilité, peuvent rendre l'interaction plus abrasive ou adhésive, accroissant le stress sur l'outil et conduisant à une usure plus rapide. Ensuite, les conditions de coupe, telles que la vitesse, la profondeur et l'avance, influencent significativement l'usure de l'outil. Des paramètres inappropriés, comme une vitesse élevée ou une avance insuffisante, peuvent surcharger l'outil et provoquer une usure prématuée (Zemzemi, Rech, Bensalem, Kapsa, & Dogui, 2007), (Slim, 2010), (ABDELALI, SALEM, RECH, DOGUI, & KAPSA, s.d.). La Figure 1-10 résume les différents facteurs qui entraînent l'usure de l'outil.

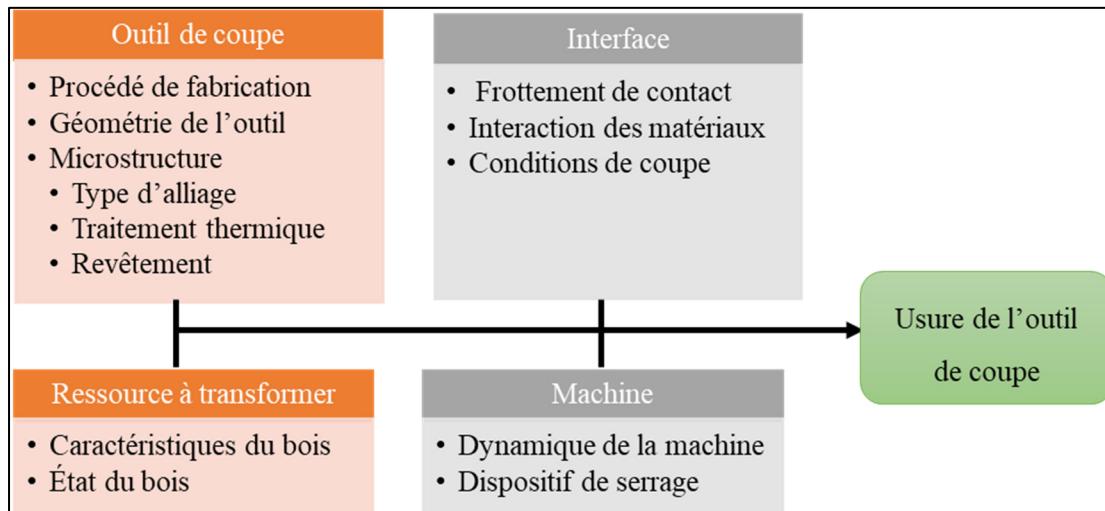


Figure 1-10 Facteurs entraînant l'usure de l'outil de coupe

1.5 Techniques d'évaluation de l'usure

Les techniques de détermination de l'usure de l'outil peuvent varier en complexité et en précision. Certaines méthodes couramment utilisées incluent l'inspection visuelle, la mesure de l'usure de l'outil et la quantification de l'usure. En combinant ces différentes techniques de

détermination de l'usure, les fabricants et les chercheurs peuvent évaluer l'état des outils de manière approfondie, ce qui permet d'optimiser les processus d'usinage, de prévoir les remplacements d'outils et d'améliorer la qualité et l'efficacité des opérations de coupe.

1.5.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle est une approche simple et largement utilisée pour évaluer l'usure de l'outil en se basant sur les changements visibles dans la géométrie de l'outil et la rugosité de la surface. Cela permet une évaluation rapide de l'état de l'outil et peut être pratique dans un environnement de production.

1.5.2 Mesure de l'usure de l'outil

Pour des mesures plus précises, des techniques avancées telles que la microscopie électronique à balayage (MEB), la profilométrie et les machines à mesurer les coordonnées (MMT) sont utilisées pour évaluer l'usure de l'outil avec une plus grande précision. Ces méthodes fournissent des données détaillées sur les dimensions et la morphologie de l'usure de l'outil (Kowaluk, Szymanski, Palubicki, & Beer, 2009), (Shyamal C. Ghosh, Heidari, Hernández, & Blais, 2015).

Jakub, Bartosz, & Grzegorz, (2011) soutiennent que le moyen le plus direct et objectif de contrôler l'usure de l'outil consiste à mesurer directement sa géométrie à l'aide de techniques telles que le contact, l'optique ou la microscopie électronique à balayage (MEB). Cependant, cette approche présente certains inconvénients, notamment le temps requis pour démonter, mesurer et remonter l'outil ou la lame. De plus, il peut être difficile de repositionner exactement l'outil dans la même position après la mesure. Malgré ces limitations, ces techniques fournissent des données objectives et absolues sur l'usure de l'outil, ce qui permet d'évaluer précisément son état et de prendre des décisions éclairées concernant son remplacement ou son entretien. Ces conclusions sont étayées par les travaux de Sheikh-Ahmad, Stewart, & Feld,

(2003), qui a malgré les inconvénients, choisi d'utiliser les techniques de mesure directe pour observer les changements dans la géométrie des bords de l'outil face à l'usure. La Figure 1-11 présente les paramètres géométriques de l'usure du bord de coupe tels que considérés par plusieurs auteurs.

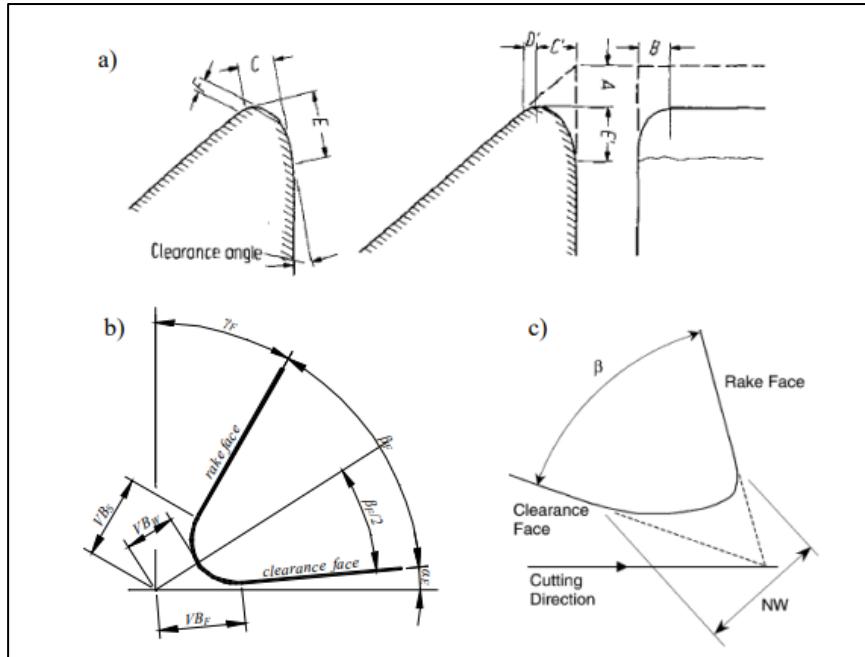


Figure 1-11 Paramètres géométriques d'usure de l'arête de coupe tels que considérés par McKenzie et Karovich (1975) (a), Porankiewicz et al. (2005) (b) et Sheikh et al. (2003) (c)
 Tirée de Jakub et al (2011)

1.5.3 Quantification de l'usure

Pour quantifier l'usure de manière plus objective, des méthodes de quantification de l'usure ont été développées. Cela inclut la mesure du volume d'usure (Čerče, Pušavec, & Kopač, 2015), le calcul du taux d'usure (Buchely, Gutierrez, León, & Toro, 2005) et l'évaluation de la largeur d'usure du flanc (Remadna & Rigal, 2006). Ces approches permettent de fournir des données quantitatives pour une analyse plus approfondie de l'usure de l'outil et de ses effets sur la performance de coupe.

Jurkovic, Korosec, & Kopac, (2005) proposent une mesure directe fiable pour évaluer différents paramètres d'usure d'outil. En utilisant des techniques modernes de traitement d'image et de vision industrielle, le système se compose d'une caméra CCD, d'une source lumineuse, d'une diode laser et d'un projecteur linéaire présenté à la Figure 1-12. L'article ne mentionne pas spécifiquement les inconvénients de la méthode présentée, mais il est possible que la mise en œuvre de la technique nécessite des compétences en traitement d'image et en programmation, et que la calibration et la mise en place du système puissent prendre du temps et nécessiter une certaine expertise. De plus, bien que la méthode soit capable de mesurer de nombreux paramètres d'usure, elle pourrait ne pas être aussi polyvalente que certaines techniques indirectes qui permettent de mesurer d'autres caractéristiques spécifiques de l'usure des outils.

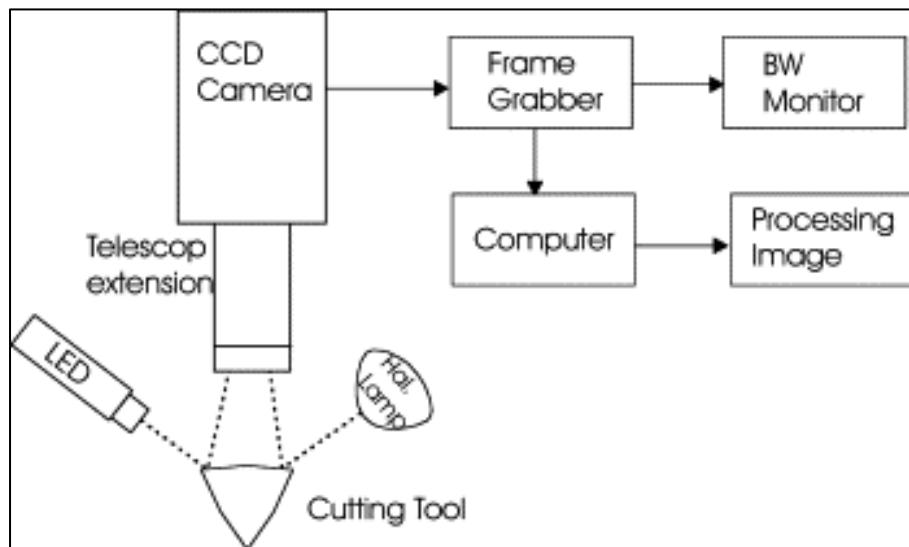


Figure 1-12 Schéma de principe du système de mesure d'usure d'outil
Tirée de Jurkovic et al (2005)

Par ailleurs Dawson & Kurfess, (2005), proposent une approche qui repose sur des algorithmes des moindres carrés développés par Levenberg et Marquardt, ainsi que des techniques d'ajustement des surfaces analytiques et paramétriques. Elle utilise des images au microscope et des représentations idéales d'outils de coupe pour comparer les données expérimentales d'outils usés et permet de quantifier les cicatrices de cratère et de flanc sur les outils de coupe

usés, fournissant ainsi une caractérisation plus complète des changements de géométrie de l'arête de coupe. De plus Lee, Myagmar, Kwon, & Han, (2022), ont développé une méthode simplifiée basée sur l'analyse directe des données de balayage tridimensionnel de l'échantillon usé, sans nécessiter de balayage de référence distinct.

1.6 Influence des éléments d'alliage et la microstructure sur les propriétés des aciers à outils

La résistance à l'usure des matériaux est fortement dépendante de leur composition chimique et microstructure. Les éléments d'alliage et leurs interactions mutuelles, en particulier avec le carbone, ont un effet déterminant sur les propriétés mécaniques et la durabilité face à l'usure. Dans la fonte, l'introduction du manganèse transforme de manière notable sa microstructure, ses caractéristiques cristallographiques et sa robustesse (BOUHAMLA, 2009). Les aspects tels que la taille, la forme, la distribution et la composition des carbures, ainsi que la structure matricielle, influencent la résistance à l'abrasion. Par exemple, les carbures M7C3 sont particulièrement résistants à l'usure abrasive. La géométrie des carbures de tungstène est également essentielle à leur comportement abrasif (Buchely et al., 2005).

Par ailleurs, la résistance à l'usure de l'acier est renforcée par les carbures de molybdène et de tungstène, une affirmation soutenue par une analyse SEM (Brajčinović, Begić Hadžipašić, & Medved, 2022). Dans les alliages d'acier, 1 % de molybdène pourrait remplacer 2 % de tungstène. Les carbures de type M6C, qui sont riches en tungstène (W) et en molybdène (Mo), bien qu'étant plus durs que les carbures Cr7C3, peuvent voir leur résistance à l'abrasion diminuée en fonction de leur dimension (Wang, Chen, & Xue, 2006). En fin de compte, la taille des particules est un facteur clé dans la résistance d'un matériau à l'usure.

De plus, d'autres éléments d'alliage comme le Bore, le Manganèse, le Nickel, le Chrome, le Molybdène, le Vanadium et le Silicium modulent les caractéristiques de l'acier. Ces éléments influent notamment par leur aptitude à générer des carbures, à intensifier la trempabilité et à diriger la transformation austénitique (Canale, Albano, Totten, & Meekisho, 2014). Il est à noter que le Chrome, le Tungstène et le Molybdène sont particulièrement précieux dans les

acières rapides, en raison de leur tendance à former des carbures résistants qui optimisent la tenue face à l'usure (Bayer & Becherer, 1989).

Tableau 1-2 Effet de certains éléments d'alliages dans l'acier rapide
Tiré de Bayer & Becherer (1989)

Élément	Effet dans l'acier rapide
Si	<p>La concentration en silicium dans l'acier à coupe rapide montre des variations subtiles des propriétés physiques jusqu'à une limite d'environ 1,00%. Une élévation de la teneur en Si de 0,15% à 0,45% induit une augmentation modérée de la dureté maximale post-trempe et modifie la morphologie des carbures, bien que cela coïncide avec une réduction marginale de la ténacité. Certains procédés industriels produisent des nuances avec une concentration en Si allant jusqu'à 0,65%. Cependant, cette concentration exige une température d'austénitisation réduite pour éviter la surchauffe comparativement à des concentrations inférieures. Il est généralement observé que la concentration en Si demeure inférieure à 0,45% pour la majorité des nuances.</p>
Cr	<p>Le chrome est un constituant essentiel des aciers à coupe rapide, présent à des concentrations oscillantes entre 3% et 5%. Il est principalement responsable de la capacité de trempabilité de l'acier. La teneur optimale en Cr est généralement fixée à 4%, une concentration qui semble équilibrer la dureté et la ténacité. Le Cr joue également un rôle crucial en minimisant l'oxydation et la décarburation pendant les traitements thermiques.</p>

Tableau 1-2 Effet de certains éléments d'alliages dans l'acier rapide (suite)

Élément	Effet dans l'acier rapide
W	Le tungstène est intrinsèque aux aciers à coupe rapide. Les carbures complexes formés par le fer, le tungstène et le carbone confèrent à ces aciers une dureté exceptionnelle, contribuant ainsi à leur résistance à l'usure. Le tungstène renforce la dureté à haute température, provoque un durcissement secondaire et résiste efficacement au revenu. Une réduction de la concentration en W est souvent compensée par l'addition de molybdène.
Mo	Le molybdène forme le même double carbure avec le fer et le carbone que le tungstène. Toutefois, il possède la moitié du poids atomique du tungstène, permettant une substitution pondérale approximative de 1:2 (Mo:W) ; c'est-à-dire, une partie de molybdène, en poids, pour deux parties de tungstène.
Mn	La concentration en manganèse dans les aciers à coupe rapide est généralement basse en raison de son effet prononcé sur l'augmentation de la fragilité, augmentant ainsi le risque de fissuration lors de la phase de trempe.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Aciers à outils pour la caractérisation

Les aciers à outils, grâce à la diversité de leurs compositions et traitements, offrent un éventail varié de propriétés mécaniques et tribologiques. Cette étude se focalise sur trois types d'aciers spécifiques fournis par notre partenaire industriel. Ces aciers proviennent de divers fournisseurs. Le Tableau 2-1 ci-dessous récapitule les différents aciers étudiés. Il détaille la désignation que nous adopterons pour chaque acier au cours de cette étude ainsi que le nom de leurs fournisseurs respectifs.

Tableau 2-1 Différents aciers étudiés

Aciers à outils	Désignation adoptée	Fournisseur
Acier A8 modifié (K329, DIN : 1.2360)	A8 mod +0%W	BÖHLER (« BÖHLER K329 », 2023)
Acier A8 modifié (X50CrMoW9-1-1)	A8 mod +1%W	-
Acier W360	W360	BÖHLER (« BÖHLER W360 ISOBLOC », 2023)

2.2 Méthodologie de quantification de l'usure

2.2.1 Présentation de l'approche proposée

L'évaluation de l'usure des outils de coupe du bois est une étape essentielle pour assurer des opérations de coupe efficaces et de haute qualité. L'approche proposée consiste à utiliser un microscope haute résolution pour effectuer des numérisations avant et après usure des couteaux ayant une résolution d'affichage de 0.1 μm , une répétabilité de 0.5 μm à haute résolution et

1µm à basse résolution (*Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual*, s.d.).

Pour cela, les couteaux neufs sont disposés sur un support spécialement conçu, puis scannés selon une procédure précise. De même, les couteaux usés sont scannés en suivant la même procédure. Les numérisations obtenues, tant pour les couteaux neufs que pour les couteaux usés, peuvent être analysées à l'aide du logiciel du microscope ou exportées vers d'autres logiciels tels que Polyworks, Matlab, Python, CloudCompare, etc. Cette méthodologie permet d'obtenir des données exploitables pour évaluer et quantifier l'usure des couteaux, offrant ainsi une approche claire et structurée dans l'étude de l'usure des outils de coupe du bois. La procédure peut être schématisée comme présentée à la Figure 2-1.

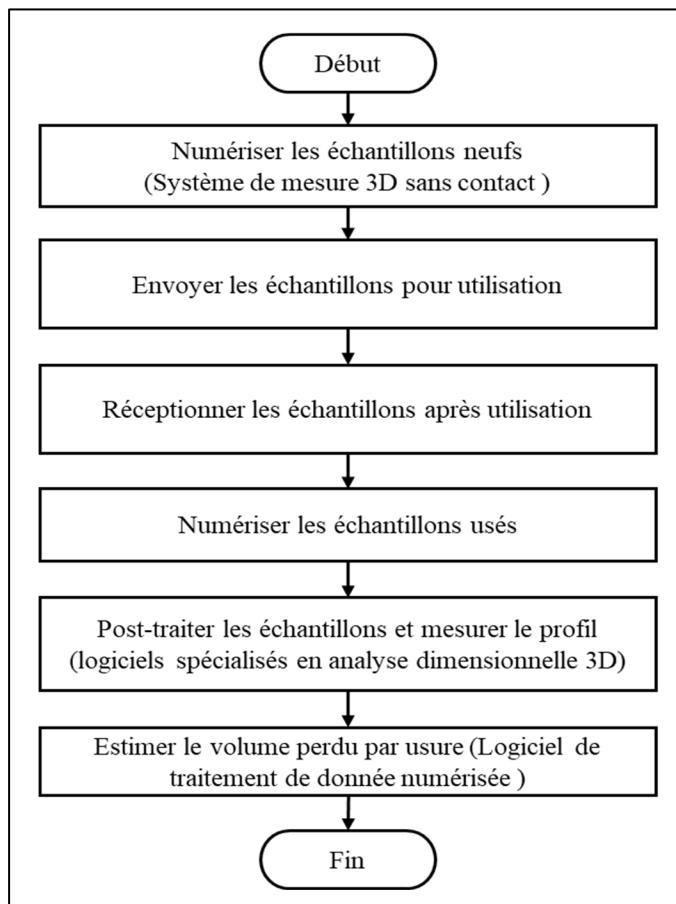


Figure 2-1 Schéma de la méthodologie de quantification de l'usure

2.2.2 Système de mesure 3D sans contact

Le Système de mesure 3D sans contact utilisé est un instrument d'imagerie avancé pouvant être utilisé pour la caractérisation de l'usure. C'est un outil de pointe pour évaluer l'usure des outils de coupe dans le domaine du bois, offrant des images haute résolution, des fonctionnalités automatisées et des capacités d'analyse avancées. Il utilise la technologie de la microscopie numérique pour capturer des images à haute résolution avec une clarté exceptionnelle. Équipé d'un objectif de haute qualité, il offre une grande profondeur de champ, permettant une visualisation en 3D des échantillons avec une netteté remarquable. Ce microscope propose des fonctionnalités automatisées de balayage et de mesure, telles que l'alignement automatique, la mise au point automatique et le positionnement précis, garantissant une utilisation facile et des mesures précises. Son logiciel convivial permet la visualisation et l'analyse des images capturées, offrant des outils d'analyse avancés de mesure (*Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual, s.d.*).

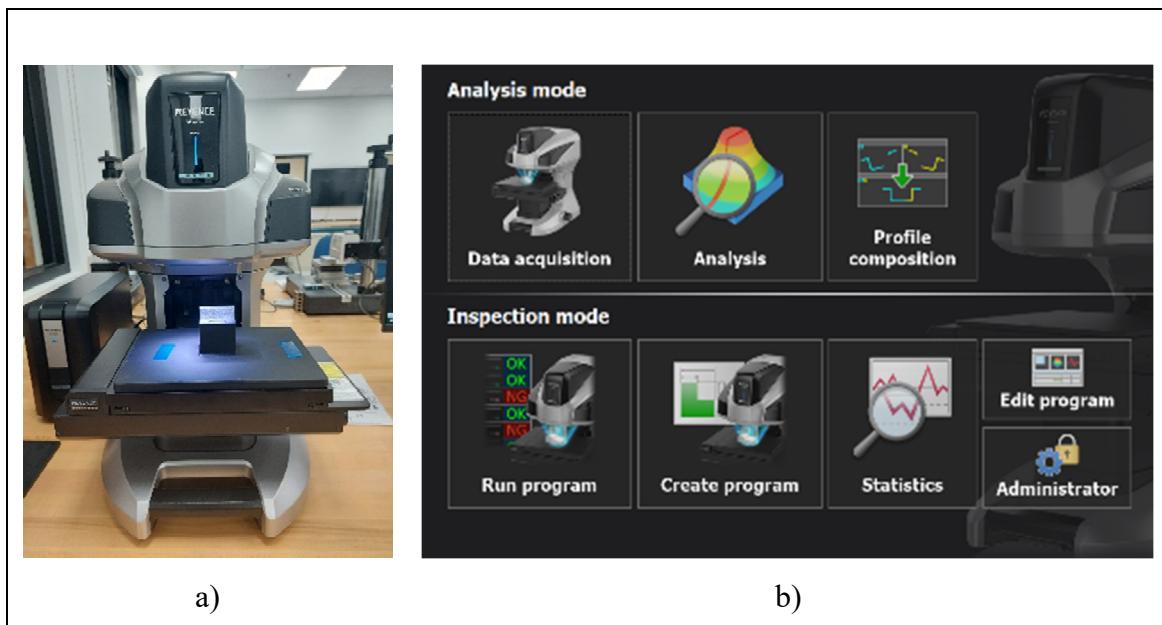


Figure 2-2 a) Microscope Keyence, b) Présentation de l'interface de son logiciel
(Laboratoire de métrologie de l'ETS)

2.2.3 Support pour couteaux et poudre de numérisation

Le support des échantillons (Figure 2-3-b) est un élément essentiel lors de la numérisation au microscope. Il est spécialement conçu pour maintenir et positionner les échantillons de manière stable et précise pendant les analyses. Le support des échantillons a été fabriqué par impression 3D à Dk-Spec en fonction des besoins spécifiques de l'expérience. Il est conçu pour assurer une fixation sécurisée des échantillons, permettant ainsi une manipulation aisée et une observation détaillée à l'aide du microscope. Le choix approprié du support des échantillons contribue à garantir la fiabilité des mesures et la reproductibilité des résultats, offrant ainsi une base solide pour l'évaluation de l'usure des outils de coupe du bois.

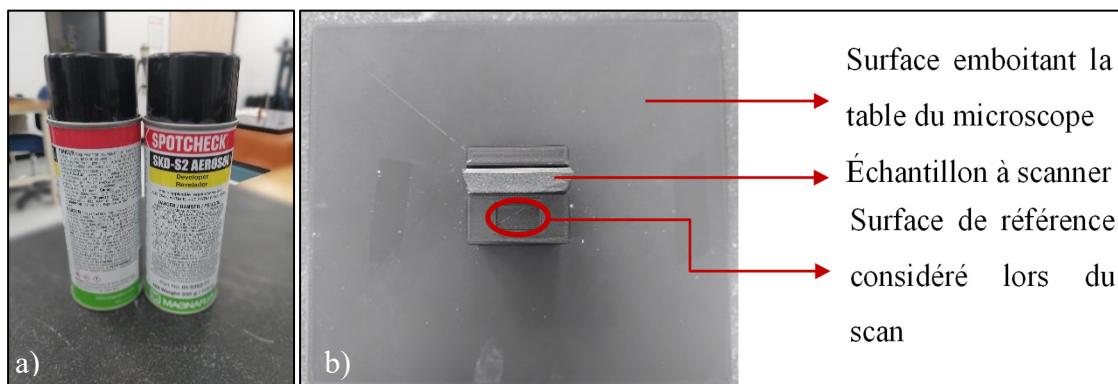


Figure 2-3 a) Poudre de Numérisation, b) Support pour couteaux

La poudre de numérisation (Figure 2-3-a) est appliquée sur les couteaux avant la numérisation pour éviter les réflexions indésirables lors de l'observation au microscope. Cette poudre, généralement composée de particules fines, est saupoudrée sur les surfaces des couteaux. Elle permet de diffuser la lumière incidente, réduisant ainsi les reflets et les effets de brillance qui pourraient interférer avec la qualité de l'image capturée. En minimisant les réflexions, la poudre de numérisation facilite la visualisation des détails et des caractéristiques de l'arête de coupe des couteaux. Cette technique est couramment utilisée lors des numérisations au microscope pour assurer une acquisition d'image optimale.

2.2.4 Logiciels utilisés pour le traitement des données

En ce qui concerne les logiciels, le logiciel du microscope Keyence se distingue par sa capacité à visualiser et à analyser des images, offrant une suite de fonctionnalités avancées telles que la mesure dimensionnelle, la cartographie de surface, l'évaluation de la rugosité, l'analyse de profil et le calcul de volume. Dans le même ordre d'idées, Polyworks est un logiciel de métrologie 3D spécialisé dédié à l'examen et au traitement des données de numérisation. Il peut gérer efficacement les nuages de points 3D, offrant des fonctionnalités telles que des comparaisons de formes, des mesures de dimensions, des analyses de déformation et des rapports détaillés. De plus, les plates-formes de programmation et d'analyse telles que Matlab et Python jouent un rôle central, en particulier dans le traitement des données et les calculs complexes.

2.3 Analyse des mécanismes d'usure

L'analyse des mécanismes d'usure se déroule en plusieurs étapes distinctes. Initialement, une observation visuelle des anomalies est réalisée. Cette première étape est suivie d'une analyse microscopique, puis d'une exploration microstructurale. Pour mener à bien l'analyse microstructurale, une préparation soignée des échantillons a été entreprise (Vander, 2004). Elle englobe :

- Une découpe abrasive à l'aide d'un cutter spécifique pour ce type de travail ;
- Un enrobage par technique de montage à chaud (« hot mounting ») pour assurer la stabilité de l'échantillon ;
- Un polissage réalisé sur une machine dédiée afin d'obtenir une surface parfaitement lisse et réfléchissante ;
- Une attaque chimique au Nital 3% pour révéler la microstructure de l'acier.

À la suite de cette préparation, un examen microstructural par Microscopie électronique à Balayage (MEB) a été effectué. Celle-ci nous a permis d'observer en détail la structure interne du matériau. Par ailleurs, l'analyse chimique a été réalisée par spectrométrie. Cette méthode a

été complétée et validée par une analyse EDX (spectroscopie de dispersion d'énergie) au MEB, garantissant la fiabilité des résultats obtenus. La dureté des différents aciers a été évaluée à l'aide d'un duromètre, offrant ainsi des indications sur leurs résistances relatives. Enfin, le logiciel JmatPro a été utilisé pour déterminer les phases présentes dans le matériau, fournissant une vue complète de sa composition et de ses propriétés intrinsèques.

2.4 Évaluation des propriétés mécaniques d'usure

La machine déployée pour les essais d'usure provient des installations de DK-Spec. À la suite d'une révision complète, des vérifications rigoureuses ont été effectuées pour s'assurer qu'elle se conforme aux exigences du standard ASTM G65, un protocole définissant les méthodes d'évaluation de l'usure par abrasion.

2.4.1 Présentation de la machine de test d'usure utilisée

La méthode d'essai selon le standard ASTM G65 définit les protocoles de laboratoire pour évaluer la résistance des matériaux métalliques face à l'abrasion par rayures, en utilisant le test de sable sec couplé à une roue en caoutchouc (International, 2004). La Figure 2-4 présente une vue d'ensemble de la machine d'essai d'abrasion disponible chez DK-SPEC.

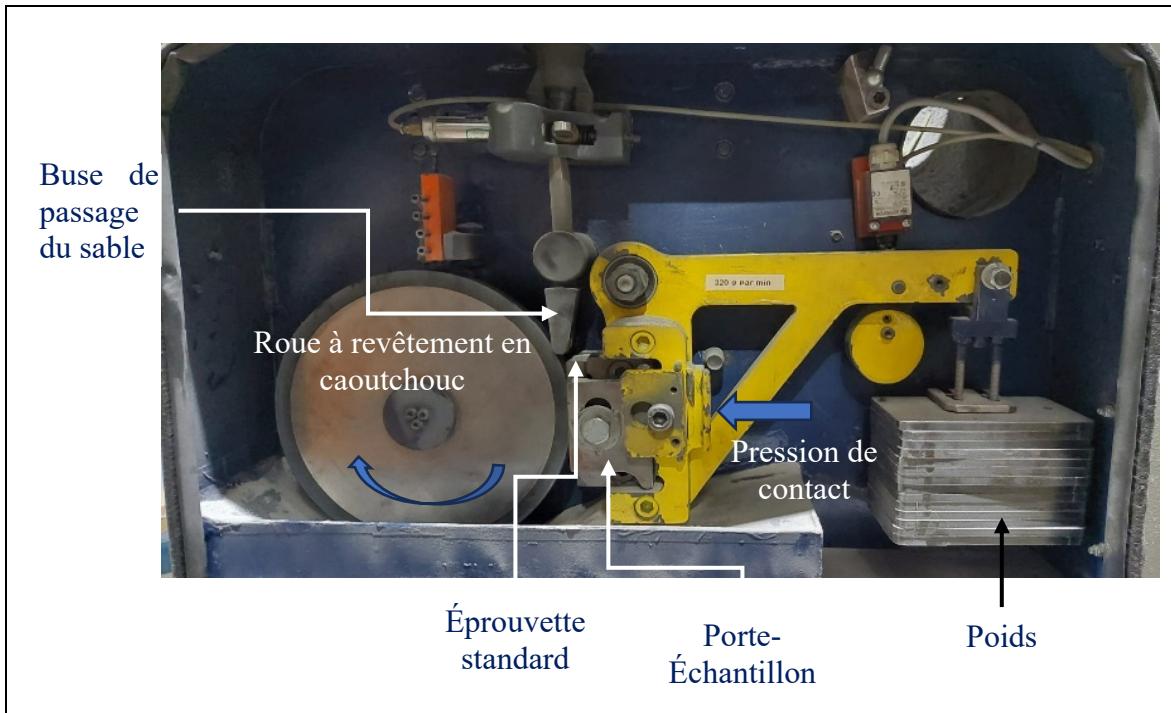


Figure 2-4 Vue d'ensemble de la machine d'essai d'abrasion présente chez DK-SPEC

2.4.2 Comparaison des paramètres

La machine d'essai d'usure utilise un abrasif spécifique, le sable à grain de quartz arrondi AFS 50/70, avec une humidité inférieure à 0,5% en poids. Sa roue de friction, d'un diamètre de $228,6 \pm 0,25$ mm, est faite de caoutchouc chlorobutyle moulé autour d'un disque d'acier AISI 1020, ayant une dureté de A 60 \pm 2 (Shore/Asker). L'essai sollicite des éprouvettes rectangulaires de 25 x 76 mm avec une épaisseur variant entre 3,2 et 12,7 mm. Selon les procédures adoptées, la durée du test varie entre 30 secondes et 30 minutes, tout en maintenant un taux de révolution de la roue à 200 ± 10 rpm (International, 2004).

La Figure 2-5 présente une vue d'ensemble de l'appareil d'essai d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec selon la norme ASTM G65 et Le Tableau 2-2 ci-dessous offre un comparatif entre les paramètres de l'appareil d'essai d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec utilisé par DK-SPEC et les recommandations du standard ASTM G65.

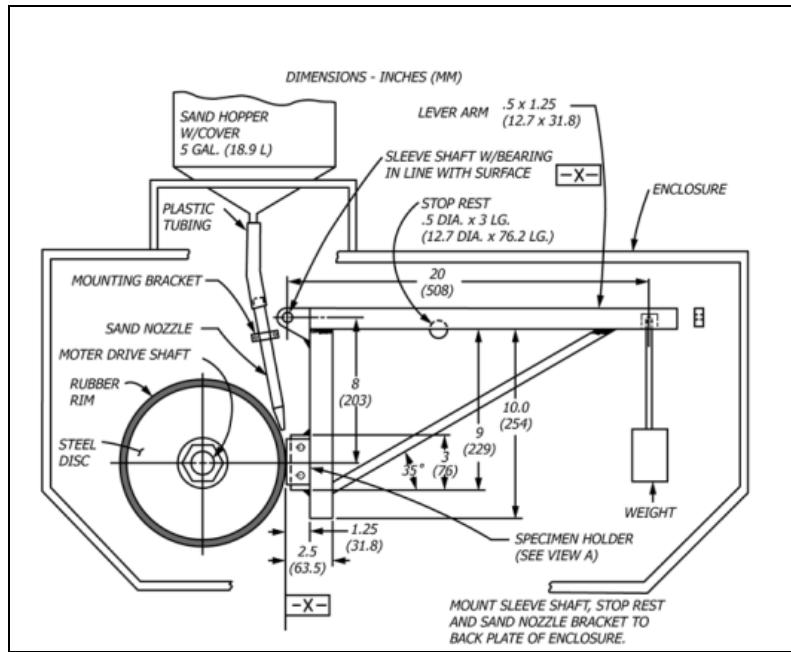


Figure 2-5 Appareil d'essai d'abrasion de roue de

sable/caoutchouc sec selon la norme ASTM G65

Tirée de International (2004)

Tableau 2-2 Comparatif des paramètres de l'appareil d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec

Paramètres	Standard ASTM G65	Machine à friction chez Dk-Spec
Abrasif	Sable d'essai AFS 50/70	Conforme au standard
La dureté du caoutchouc de la roue	$A 60 \pm 2$ (Dureté Shore ou Asker)	-
Diamètre de la roue	$228,6 \pm 0,25 \text{ mm}$	Conformes au standard
Débit de sable	300 à 400 g/min	320 g/min
Taux de révolution de la roue	$(200 \pm 10 \text{ rpm})$	200 rpm
Force contre spécimen	130 N	130 N
Dimensions des éprouvettes	25 x 76 mm, épaisseur 3,2 à 12,7 mm	Conformes au standard

Les paramètres du test sont répertoriés dans le Tableau 2-3. Étant donné que les échantillons testés présentent une résistance allant de moyenne à extrême face à l'abrasion, nous avons choisi d'adopter la procédure A. Il est à souligner que si la perte volumique excède 100 mm³, nous nous orienterons vers la procédure B. Cette dernière est une version abrégée de la procédure A, spécialement conçue pour de telles situations.

Tableau 2-3 Paramètres du test d'abrasion de roue de sable/caoutchouc sec
Tirée de International (2004)

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^B N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion ^A	
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

^A See 8.4.
N = Newton (SI metric term for force)
1 lbf = 4.44822 N
1 Kgf = 9.806650 N
^B Force tolerance is $\pm 3\%$.

CHAPITRE 3

ETUDE DES MECANISMES D'USURE

3.1 Analyse des caractéristiques des aciers à outils

L'étude approfondie des caractéristiques des aciers à outils s'avère cruciale, car elle facilite une compréhension holistique des propriétés intrinsèques de ces aciers spécifiques. Initialement, une exploration de leur composition chimique sera menée, principalement à travers l'application de la spectrométrie. Cette technique, reconnue pour sa précision, permet d'identifier et de quantifier avec exactitude les éléments constitutifs. Ensuite, une analyse rigoureuse de la dureté, fréquemment utilisée comme critère déterminant de la qualité de l'acier, sera réalisée. Pour conclure, notre attention se portera sur le diagramme de phases et la composition associée, révélant ainsi la microstructure de l'acier ainsi que les interrelations complexes entre ses phases. La combinaison de ces études distinctes fournira un tableau exhaustif et détaillé des spécificités et fonctionnalités des aciers à outils.

3.1.1 Composition chimique

Les résultats relatifs à la composition chimique des différents aciers à outils, obtenus par spectrométrie, sont consignés dans le Tableau 3-1. À première vue, des variations significatives dans les compositions sont observables. Les aciers A8 modifiés, tant dans la variante +0%W que +1%W, présentent des teneurs élevées en chrome et en silicium par rapport au W360. De son côté, le W360 se distingue par une concentration nettement supérieure en molybdène et en vanadium. Par ailleurs, la présence accrue de tungstène dans l'A8 mod+1%W est manifeste.

Tableau 3-1 Composition chimique des aciers à outils soumis à notre étude

AISI/SAE	C	Cr	Mo	W	V	Si	Mn	Ni	Cu
A8 mod+0%W	0.516	7.76	1.27	0.0768	0.338	0.832	0.326	0.368	0.121
A8 mod+1%W	0.538	7.93	1.17	1.05	0.077	0.786	0.375	0.144	0.0385
W360	0.513	4.43	3.08	0.0296	0.565	0.226	0.221	0.0778	0.0451

3.1.2 Microstructure

Une caractérisation de la microstructure du matériau étudié a été réalisée en utilisant la technique de microscopie électronique à balayage (MEB). Cette analyse a permis d'observer en détail la structure du matériau à l'échelle microscopique, mettant en évidence les grains, les différentes phases, ainsi que les précipités (Figure 3-1). La microscopie électronique à balayage (MEB) sur ces outils a révélé une microstructure composée d'une matrice martensitique parsemée de carbures primaires. De plus, pour évaluer la taille des grains de chaque matériau, une analyse a été effectuée sur trois images micrographiques en utilisant le logiciel ImageJ, offrant une perspective quantitative de leur distribution et de leur morphologie.

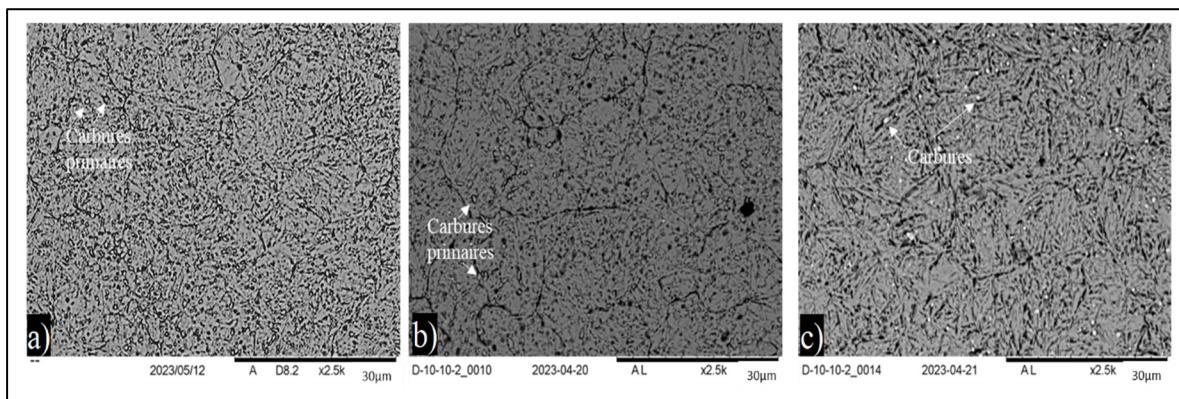


Figure 3-1 Microstructure des aciers à outils a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360

Afin d'identifier la nature des précipités, une analyse EDX (spectroscopie dispersive en énergie) a été entreprise. L'analyse EDX est une technique associée au MEB qui permet de déterminer la composition élémentaire d'une zone spécifique de l'échantillon. Grâce à elle, il est possible d'obtenir une signature chimique des zones d'intérêt, facilitant ainsi la distinction et la caractérisation des phases ou des précipités présents. La Figure 3-2 présente les résultats de cette analyse.

En se référant à la Figure 3-2, L'analyse EDX de l'acier A8mod+0%W a révélé une distribution intéressante d'éléments. Notamment, nous observons une concentration élevée de précipités composés principalement de Cr, Mn, V, et Mo. Ces éléments sont répartis sous forme de précipités distincts dans la matrice de l'acier, indiquant probablement une phase de renforcement ou une phase secondaire qui pourrait influencer les propriétés mécaniques. En revanche, l'acier A8mod+1%W présente une composition similaire à celle de l'acier A8mod+0%W, mais avec l'ajout notable de tungstène (W). Le tungstène est un élément qui est souvent ajouté pour améliorer encore davantage les propriétés mécaniques de l'acier, notamment sa résistance à la chaleur et sa dureté. Sa présence dans l'acier A8mod+1%W suggère que ce matériau a été conçu pour des applications nécessitant une meilleure performance dans des conditions plus exigeantes. De plus, l'acier W360 montre une présence plus marquée de carbure de molybdène et de vanadium.

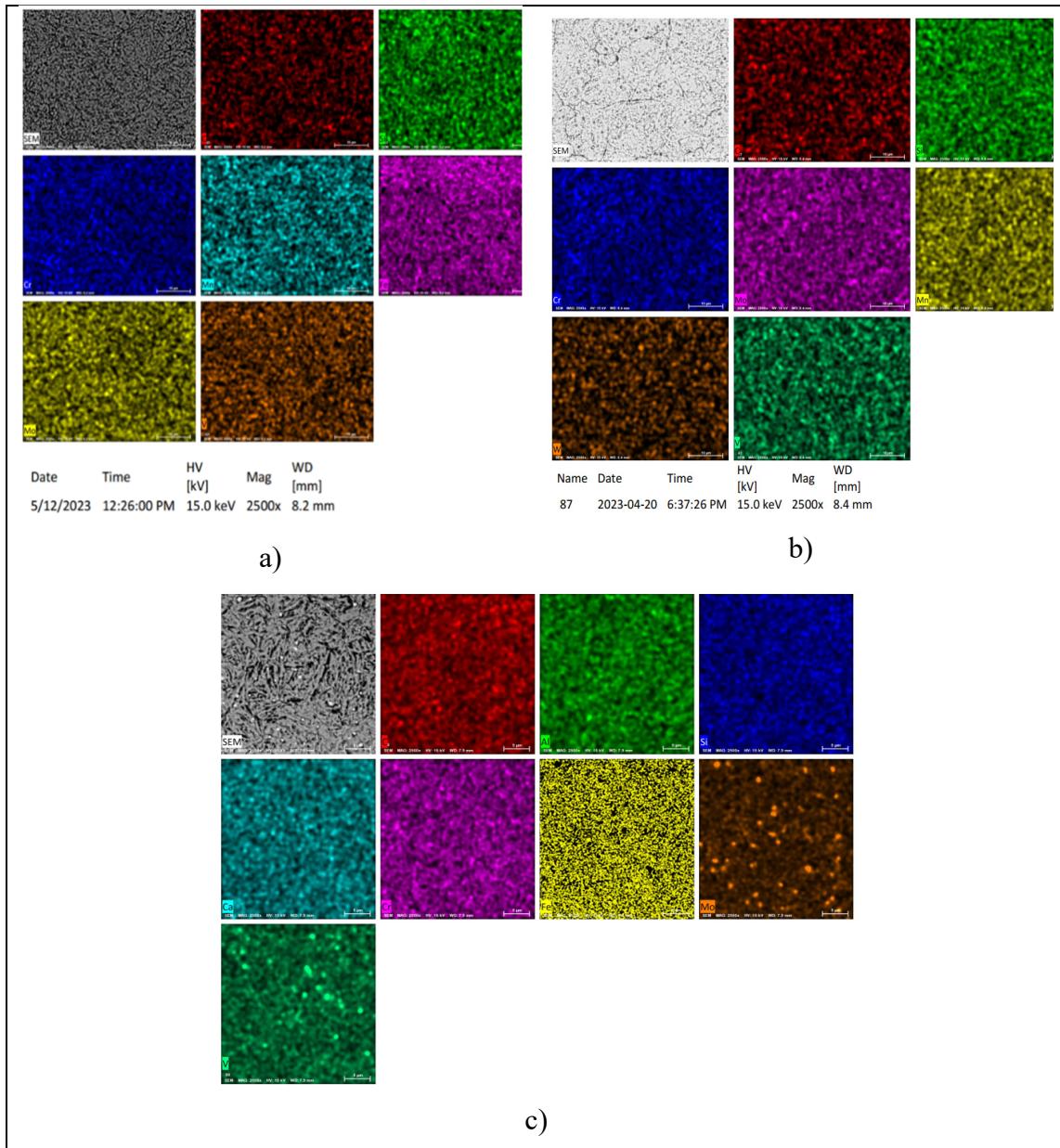


Figure 3-2 Analyse EDX a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360

Outre l'analyse de la composition élémentaire, les phases présentes dans chaque matériau ont été déduites en utilisant le logiciel Jmatpro. Ce logiciel, spécialisé dans la prédiction des propriétés et de la microstructure des alliages, a été employé pour tracer le diagramme de phase correspondant au matériau étudié (Figure 3-3). Les phases identifiées grâce à Jmatpro ont ensuite fait l'objet d'analyses complémentaires.

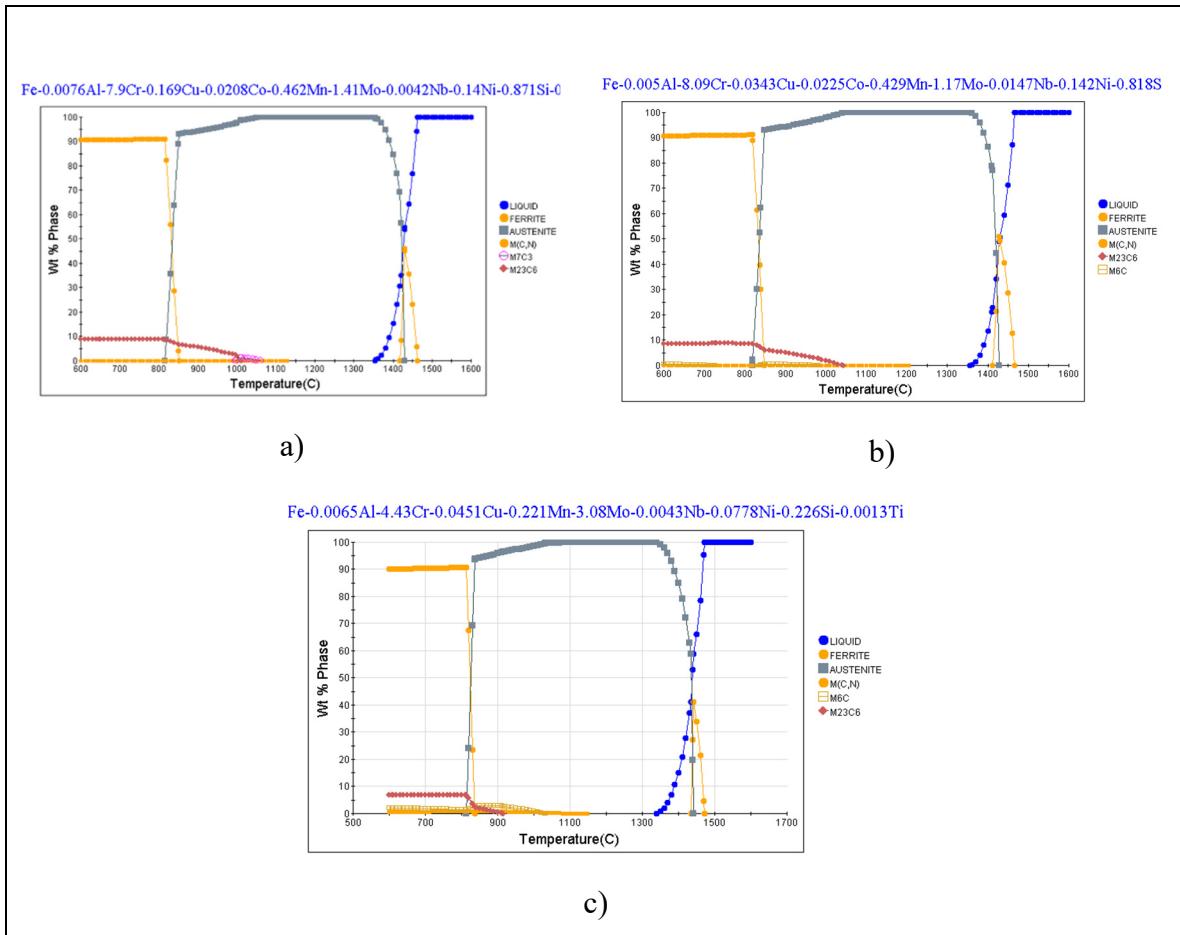


Figure 3-3 Diagramme de phase a) A8 mod+0%W, b) A8 mod+1%W, c) W360

Le diagramme de phase des trois aciers présentés à la Figure 3-3, révèle une variété complexe de phases qui coexistent à différentes compositions et températures. De manière générale, les phases liquide, la ferrite, l'austénite et M(C, N) sont présentes dans tous les trois aciers. Il est à noter que la phase M₂₃C₆ est prédominante dans chaque acier, suggérant qu'elle joue un rôle clé dans leurs propriétés microstructurales et mécaniques.

L'acier A8mod+0%W se distingue par la présence exclusive de la phase M₇C₃. Cette phase, absente des deux autres aciers, pourrait influencer de manière spécifique les propriétés de l'acier A8mod+0%W. En ce qui concerne les phases spécifiques aux autres aciers, l'acier A8mod+1%W et l'acier W360 contiennent tous deux la phase M₆C. Cette phase pourrait contribuer à des propriétés distinctives pour ces deux aciers par rapport à l'acier A8mod+0%W.

Des détails supplémentaires concernant les températures de transition, les compositions exactes, et d'autres informations pertinentes pour ajouter une description plus complète sont exposés dans le Tableau 3-2 qui présente un récapitulatif des résultats obtenus à partir de l'analyse microstructurale. Ces résultats compilent les observations et mesures issues de la microscopie électronique à balayage, l'analyse EDX pour la détermination de la composition des précipités, ainsi que les dimensions des carbures. De plus, les phases déduites grâce à l'utilisation du logiciel Jmatpro y sont également énumérées. Ce tableau vise à fournir une vue d'ensemble des principales caractéristiques microstructurales du matériau étudié, permettant une consultation rapide et efficace des données clés.

Tableau 3-2 Récapitulatif des résultats obtenus à partir de l'analyse microstructurale

Échantillons	A8mod+0%W	A8mod+1%W	W360
Microstructure	Martensitique	Martensitique	Martensitique
Taille des grains	1.1± 0.4µm	0.9± 0.2µm	0.8 ±0.24 µm
Carbure M(C,N)	V, Nb	Nb	V
Temp. Diss. M(C,N)	1130°C	1205°C	1147°C
Carbure M7C3	Cr	-	-
Temp. Diss. M7C3	1060°C	-	-
Carbure M6C	-	W	Mo
Temp. Diss. M6C	-	981°C	1032°C
Carbure M23C6	Cr, Fe	Cr, Fe	Cr, Fe
Temp. Diss. M23C6	1010°C	1044°C	916°C

3.1.3 Dureté

Un test de dureté HRC a été effectué sur les matériaux étudiés en utilisant un pénétrateur conique en diamant. La mesure repose sur la profondeur de pénétration du pénétrateur sous deux charges distinctes : une précharge initiale de 10 kgf suivie d'une charge totale de 150 kgf. L'évaluation de la dureté est basée sur la différence de profondeur de pénétration entre ces deux charges (Testing, 2019). L'échelle HRC, adaptée aux matériaux durs, est utilisée comme référence pour ce test. La Figure 3-4 illustre les résultats du test de dureté, obtenus en calculant la moyenne transversale de trois mesures effectuées à chaque point comme présenté sur l'image de la Figure 3-4-a.

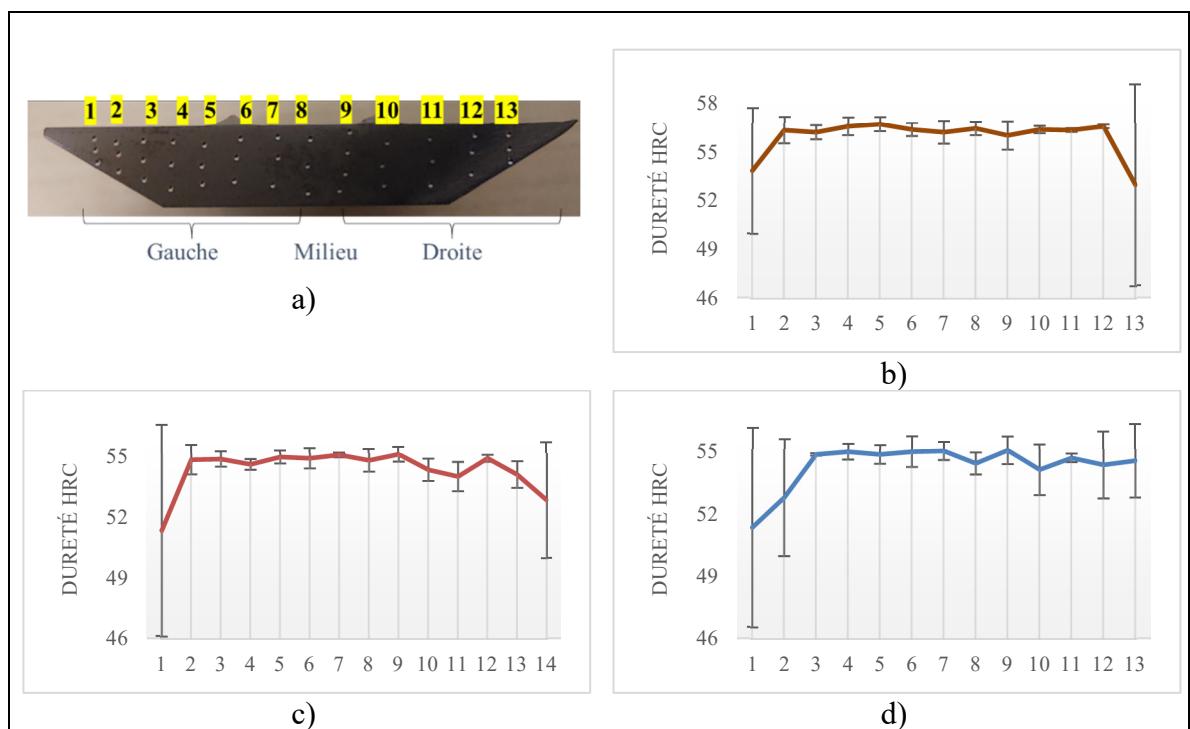


Figure 3-4 Dureté de Rockwell a) Trace d'indentation du cône en diamant b) A8 mod+0%W, c) A8 mod+1%W, d) W360

Après synthèse des mesures réalisées lors du test de dureté, les valeurs obtenues pour chaque type d'acier sont présentées dans le Tableau 3-3. Les résultats permettent d'apprécier la dureté relative de ces alliages, soulignant les nuances en fonction des différentes compositions.

Tableau 3-3 Dureté de Rockwell en fonction du type d'acier

Acier	A8mod+0%W	A8mod+1%W	W360
Dureté de Rockwell (HRC)	55.91 ± 1.14	54.33 ± 1.05	54.29 ± 1.07

3.2 Mécanismes d'usure et d'endommagement des aciers à outils

Après avoir été utilisés sur une plage de 124 heures, des observations visuelles des mécanismes d'endommagement peuvent être effectuées sur les couteaux d'équarrissoiseuses. Ces observations (Figure 3-5) montrent des détachements significatifs de matière sur certains couteaux revêtus, ce qui est probablement dû à l'état du bois. Ceci suggère une vulnérabilité potentielle de ces échantillons.

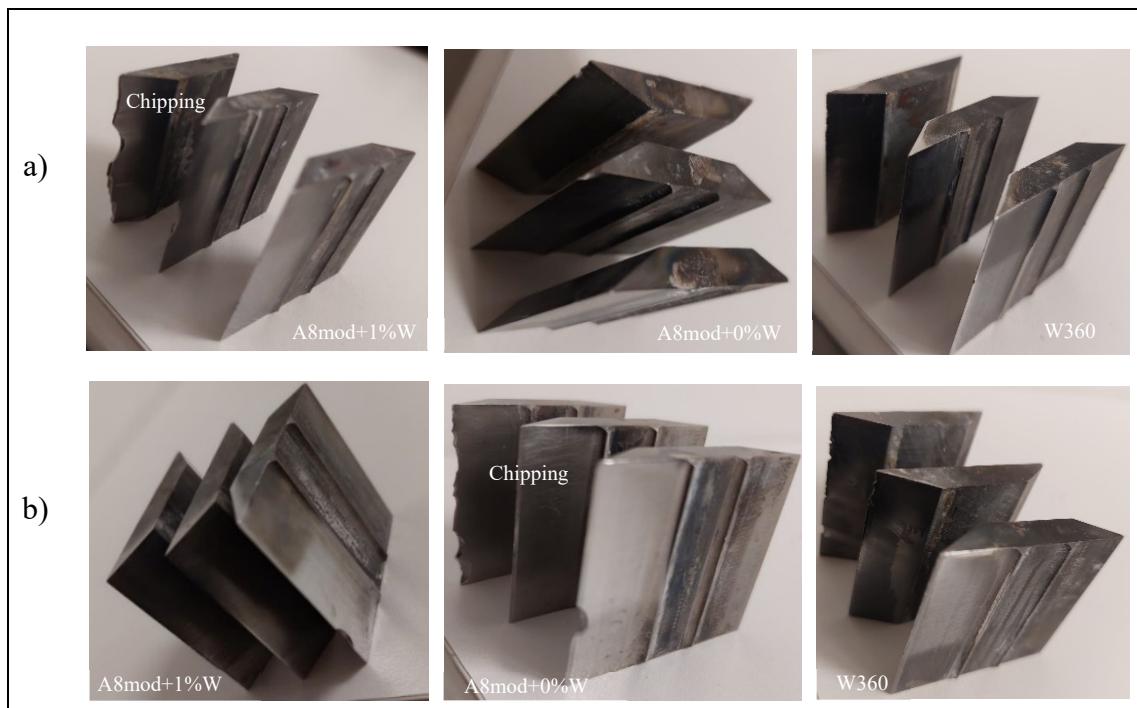


Figure 3-5 Couteaux usés a) avec revêtement et b) sans revêtement

3.2.1 Acier A8 mod +1%W

Des micrographies SEM typiques montrant les vues de la surface de l'outil sont présentées comme suit (Figure 3-6) :

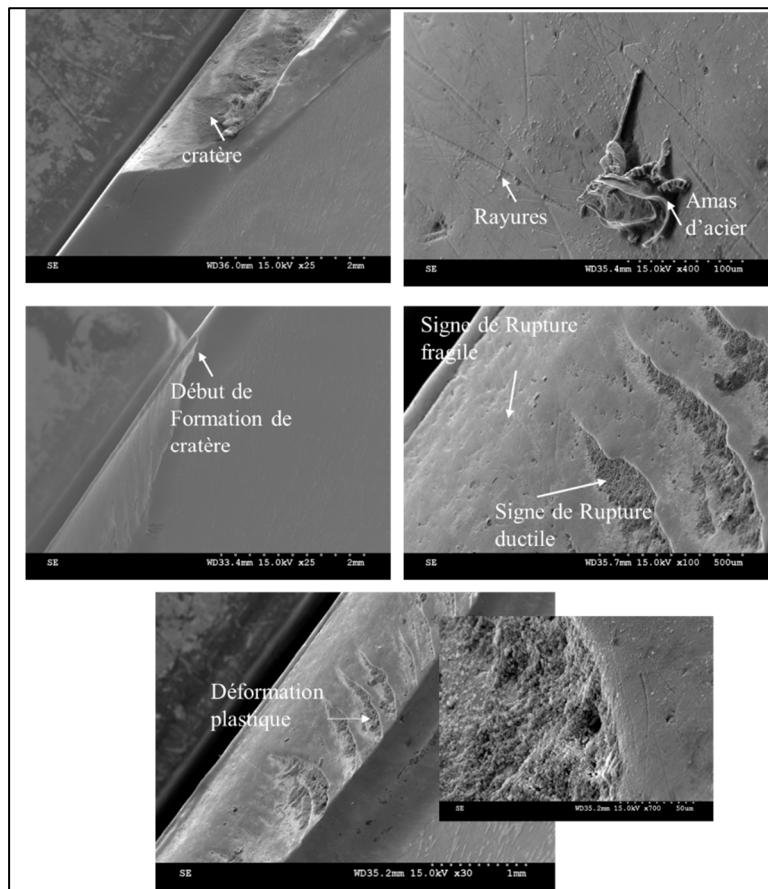


Figure 3-6 Mécanismes d'endommagement pour l'acier A8 mod+ 1%W

Il est intéressant d'observer qu'il n'y a pas de fissures aux alentours de l'usure, mais juste des déformations à la fois ductile et fragile. Par ailleurs, à la surface de l'outil (Figure 3-6), nous observons des mécanismes d'usure tels que l'abrasion, qui se manifeste par des rayures et une diminution de la netteté de l'arête de coupe. L'adhésion est visible à travers la formation de cratères, tandis que l'usure par fatigue se traduit par une déformation plastique.

3.2.2 Acier A8 mod +0%W

Des observations similaires de la surface des outils sont constatées pour l'acier A8 mod + 0%W; cependant, des fissures sont observées à proximité de l'écaillage. La Figure 3-7 présente des micrographies SEM typiques montrant les vues de la surface de l'outil.

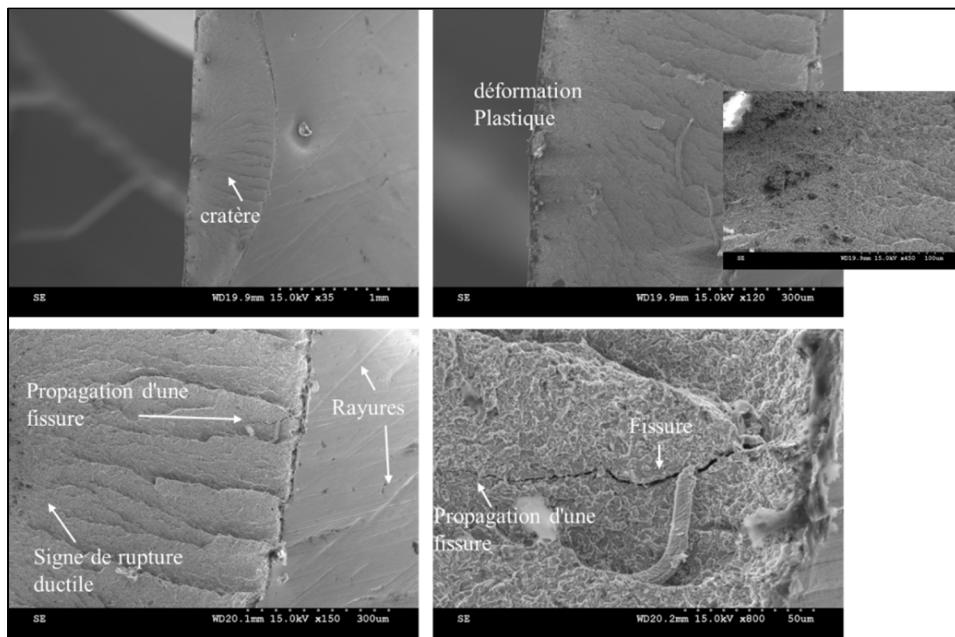


Figure 3-7 Mécanismes d'endommagement pour l'acier A8 mod+ 0%W

3.2.3 Acier W360

D'autre part, l'acier W360 ne présente aucune dégradation significative de la surface de l'outil, à l'exception de quelques récessions et quelques éclatements au niveau de l'arête. Cette observation est particulièrement remarquable, car les trois aciers ont été soumis au même nombre d'heures de travail. Cela met en évidence la résistance supérieure aux chocs de l'acier W360 par rapport aux deux autres. Des micrographies SEM typiques à la Figure 3-8 illustrent cela.

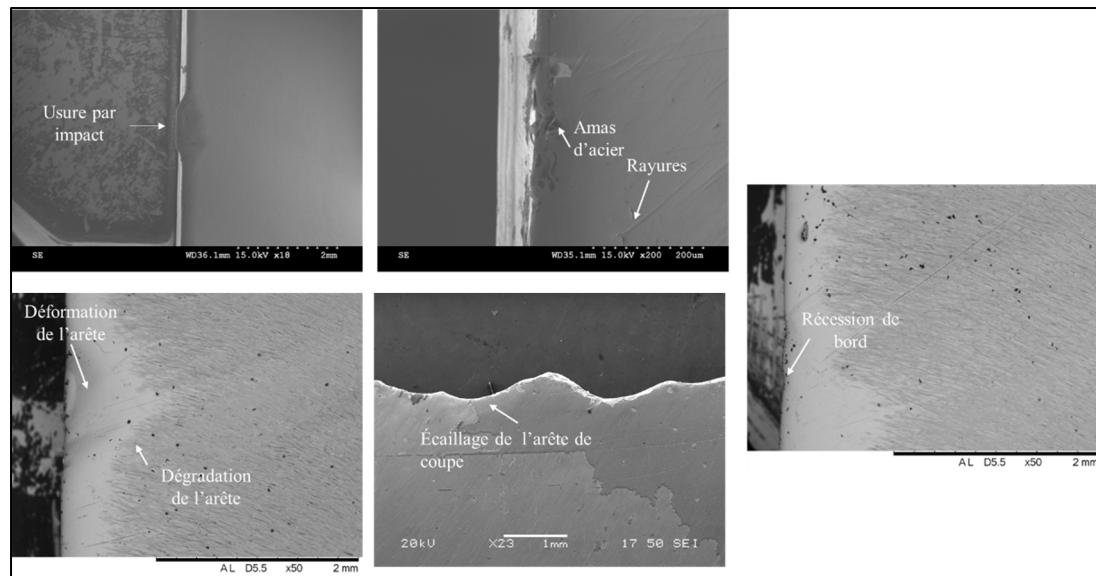


Figure 3-8 Mécanismes d'endommagement pour l'acier W360

3.3 Défaillances liées à l'usure des aciers à outils de l'expérience

Dans cette sous-section, nous entreprendrons une étude approfondie des défaillances liées à l'usure des aciers à outils, en mettant en lumière deux aspects cruciaux qui façonnent leur durabilité et leur performance : l'effet de la composition chimique sur le phénomène d'usure, ainsi que l'effet des revêtements appliqués sur ces aciers. La Figure 3-9 présente la surface des outils usés avec et sans revêtement et le Tableau 3-4 présente un récapitulatif des mécanismes d'usure observés dans chaque cas, permettant ainsi de mieux comprendre comment ces facteurs interagissent et influencent la résistance à l'usure de ces matériaux.

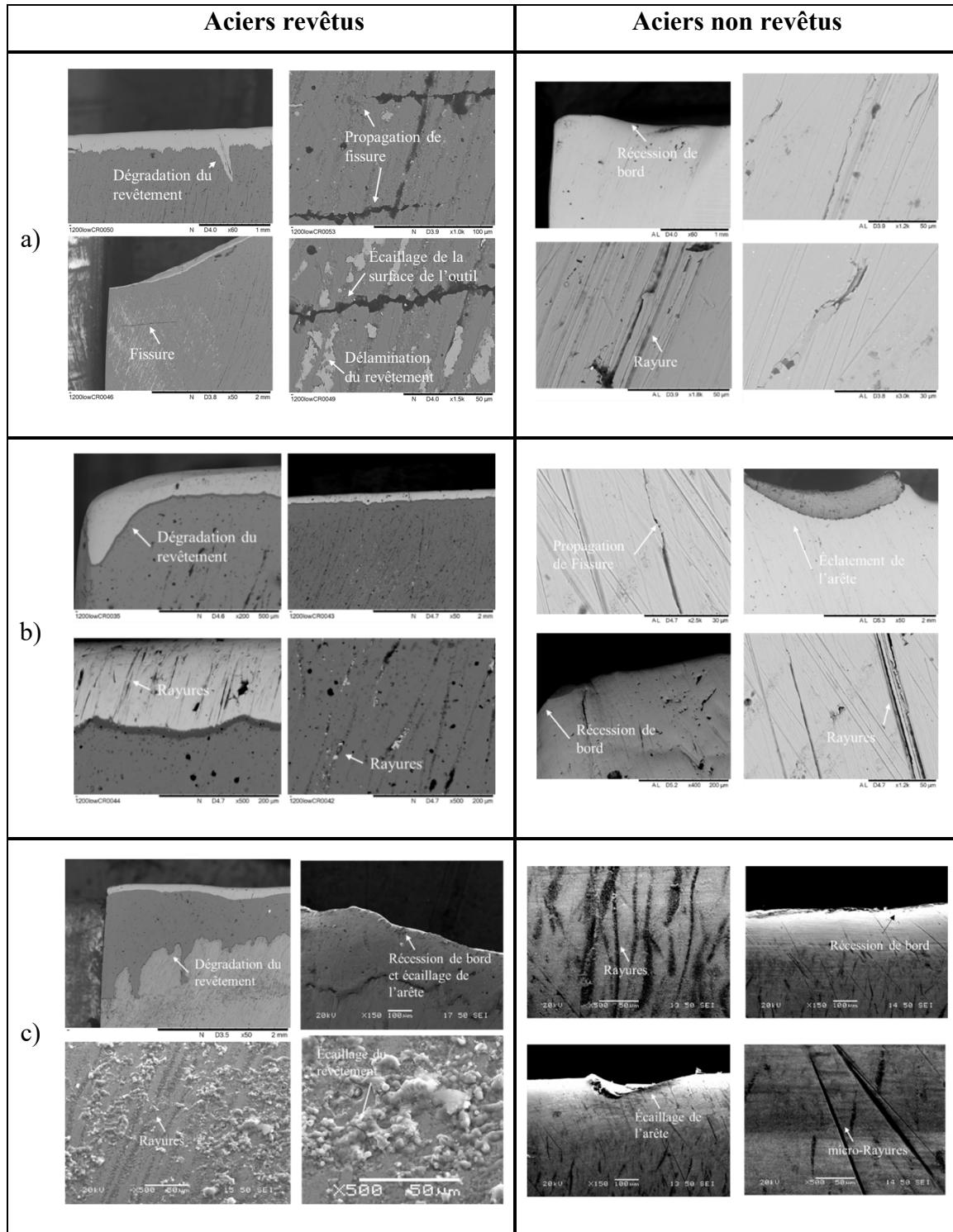


Figure 3-9 Mécanismes d'usure a) A8 mod+1%W b) A8 mod+0%W c) W360

Tableau 3-4 Défaillances liées à l'usure des aciers à outils de l'expérience

Défaillances		Aciers non revêtus			Aciers revêtus		
		A8mod +1%W	A8mod +0%W	W360	A8mod +1%W	A8mod +0%W	W360
Usure par Abrasion	Diminution de la netteté de l'arête	x	x	x	x	x	x
	Rayures	x	x	x	x	x	x
	Dégénération de l'arête	x	x	x	x	x	x
Usure par Adhésion	Cratères		x		x		
	Arrachement de matières		x		x		
Usure par Impact	Écaillage de l'arête	x	x	x	x	x	x
	Microfissures		x		x		
	Déformation plastique		x		x		

Il est intéressant de noter que les mécanismes d'usure prédominants pour les trois aciers étudiés sont l'usure par abrasion et l'usure par impact. Cela suggère que dans les conditions d'application spécifiques, ces deux types d'usure ont un impact significatif sur la durabilité et la performance des aciers à outils. De plus, il est remarquable que l'acier W360 présente une résistance à l'usure supérieure par rapport aux deux autres aciers, ce qui peut être attribué à sa composition chimique spécifique et à ses propriétés intrinsèques.

3.4 Discussion des résultats

Dans le cadre de l'étude des mécanismes d'usure des aciers à outils, l'analyse approfondie des caractéristiques intrinsèques et de la composition chimique des aciers, ainsi que des tests de dureté et des examens microstructuraux, ont révélé des connaissances significatives. Les trois aciers, bien que proches en termes de dureté, ont montré des variations notables dans leur

composition chimique et leur résistance à l'usure. L'acier W360, avec sa teneur moindre en chrome, mais plus élevée en molybdène et en vanadium, a démontré une résistance supérieure à l'usure et aux chocs, remettant en question les notions conventionnelles qui privilégient la teneur en chrome pour la résistance à l'abrasion (Bayer & Becherer, 1989).

Les observations microstructurales ont mis en lumière l'importance de la taille des grains et de la nature des carbures dans la détermination des propriétés mécaniques de ces aciers comme démontrées dans la littérature (Wang et al., 2006), (Brajčinović et al., 2022). Les revêtements ont prouvé leur efficacité en réduisant significativement l'usure, mais une attention particulière doit être accordée à la compatibilité du revêtement avec le type d'acier, comme le suggère l'usure plus prononcée de l'acier A8 mod+1%W revêtu.

Ces résultats ont des implications majeures pour l'industrie du bois, guidant la sélection des aciers et des revêtements pour optimiser la durée de vie et la performance des outils. Ils indiquent également que la résistance à l'usure est une caractéristique multifactorielle, dépendant de la composition chimique, de la microstructure, et de l'interaction avec les revêtements.

3.4.1 Effet de la Composition chimique

En se basant sur les résultats d'usure (Figure 3-6, Figure 3-7 et Figure 3-8), il est intéressant de noter que l'acier W360 ne correspond pas nécessairement aux tendances conventionnelles observées dans la littérature concernant les propriétés des aciers à outils. Contrairement à certaines attentes, il affiche une résistance à l'usure exceptionnelle, surpassant les deux autres aciers de l'expérience, malgré sa composition chimique particulière. En effet, dans la littérature, on a généralement observé que les aciers à outils à haute teneur en chrome étaient réputés pour leur meilleure résistance à l'abrasion, que ceux contenant du tungstène et du carbure de tungstène étaient connus pour leur résistance à l'usure abrasive, que les aciers à haute teneur en nickel, manganèse et silicium étaient réputés pour leur meilleure résistance à la fatigue, et que les aciers à haute teneur en tungstène et en molybdène étaient couramment

utilisés pour résister à l'érosion (Bayer & Becherer, 1989). Cependant, l'exceptionnelle résistance à l'usure de l'acier W360, malgré sa composition chimique atypique par rapport à ces clichés, souligne la complexité de la résistance à l'usure des aciers à outils dans l'industrie du bois.

3.4.2 Effet du Revêtement

Lorsque l'on se base sur les images microscopiques de la surface des outils revêtus (Figure 3-9), on peut clairement observer une réduction significative de l'usure par rapport à ceux qui ne sont pas revêtus. Ces observations mettent en évidence de manière convaincante l'effet bénéfique du revêtement en termes de réduction de l'usure pour ces aciers à outils (Kharrat, Baccar, & Dammak, 2020). Toutefois, il est intéressant de noter un phénomène étonnant en ce qui concerne l'acier A8 modifié, contenant 1% de tungstène. Dans ce cas particulier, les images microscopiques révèlent une usure plus prononcée, principalement due à l'usure par impact. Cette observation inattendue soulève des questions importantes quant à la compatibilité du revêtement avec cet acier spécifique, indiquant la nécessité d'une analyse approfondie pour comprendre les raisons sous-jacentes de cette réaction inhabituelle entre le revêtement et l'acier.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION DE L'USURE DES ACIERS À OUTILS POUR L'USINAGE DU BOIS

4.1 Introduction

Lors de la coupe du bois, les outils sont soumis à des contraintes considérables, telles que la friction, l'abrasion et l'impact, qui entraînent une détérioration progressive de leurs arêtes de coupe. Cette usure peut avoir un impact direct sur la qualité du produit final, la durée de vie des outils, les coûts d'usinage et la productivité globale. Par conséquent, en évaluant et en quantifiant l'usure, on peut prolonger la durée de vie des outils, améliorer la qualité du produit final, optimiser les paramètres de coupe et réduire les coûts d'usinage.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'usure des aciers à outils en utilisant la méthodologie de quantification d'usure des outils de coupe du bois proposée, d'analyser les résultats et de comparer les résultats pour trois aciers à outils désignés.

4.2 Description des étapes de quantification de l'usure

4.2.1 Étape 1 : Numérisation des couteaux avant usure

La numérisation des couteaux avant usure consiste à réaliser une numérisation des couteaux neufs avant leur utilisation. Cette étape permet d'obtenir une représentation numérique précise de l'état initial des couteaux, sans aucun signe d'usure. Les couteaux sont placés sur le support adapté spécialement conçu pour maintenir leur position et garantir une numérisation précise et cohérente. Le processus de numérisation est effectué à l'aide du microscope Keyence. Les données résultantes fournissent une référence visuelle et géométrique pour comparer l'état des couteaux avant et après leur utilisation, et ainsi évaluer l'ampleur de l'usure sur leur arête de coupe. Cette étape de numérisation avant usure constitue une base essentielle pour l'analyse de l'évolution de l'usure des couteaux et la quantification des changements au fil du temps. La Figure 4-1-a présente un exemple de numérisation avant usure obtenu au microscope Keyence.

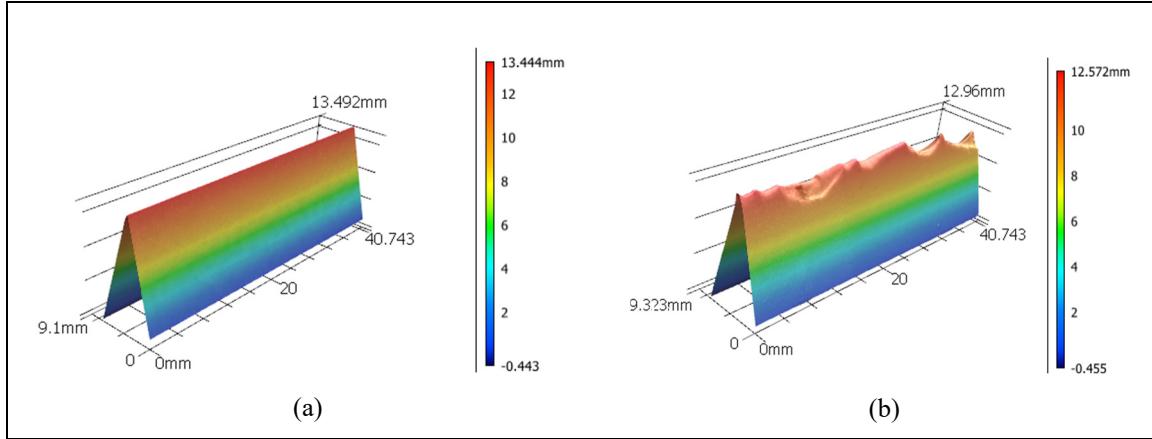


Figure 4-1 a) Numérisation du tranchant initial, b) Numérisation du tranchant après usure

4.2.2 Étape 2 : Numérisation des couteaux après usure

Une fois les couteaux soumis à des opérations de coupe du bois, ils sont retirés de la machine et placés sur le support pour garantir une position stable pendant la numérisation. En numérisant les couteaux usés, on obtient une représentation numérique de l'état de l'arête de coupe après avoir été soumise à l'action de la coupe du bois comme le présente la Figure 4-1-b. Ces numérisations permettent de visualiser les changements géométriques et de détecter les signes d'usure tels que la déformation ou la fracture de l'arête de coupe. L'analyse des numérisations des couteaux après usure permet de quantifier l'usure et d'observer l'état de changement dans l'usure du couteau.

4.2.3 Étape 3 : Quantification de l'usure

La quantification de l'usure consiste à évaluer le volume de matière qui sera perdu après utilisation des couteaux d'équarrisseuses. Pour mesurer ce volume, la fonction de calcul de volume du logiciel du microscope est utilisée. Une autre méthode consiste à exporter les numérisations des couteaux sous un format 3D STL et à les analyser dans des logiciels spécialisés comme PolyWorks, MATLAB/Python ou CloudCompare. Ces plateformes offrent des outils permettant d'étudier en détail les données 3D. En superposant les modèles 3D avant

et après usure, on obtient également une perspective visuelle des zones et du volume de matière perdue.

La vitesse à laquelle un couteau s'use est représentée par le taux d'usure. On calcule ce taux en mesurant la quantité de matériau perdu par unité de temps. Pour obtenir cette valeur, on divise la différence de volume du couteau entre son état initial et son état après usure par la durée d'utilisation. Cet indicateur est crucial, car il permet d'évaluer la performance d'un outil, de comparer différentes techniques ou matériaux, et d'anticiper si un ajustement des conditions d'usinage est nécessaire.

Enfin, le profil d'usure qui se développera sur les couteaux donnera des indications sur la manière dont ils s'usent. Le profil d'usure, qui décrit la morphologie des zones d'usure sur la surface de coupe, varie selon le matériau à couper et les propriétés de l'outil. Les motifs d'usure peuvent inclure des formes comme l'usure par copeaux, le long du bord tranchant, ou d'autres motifs plus irréguliers. À l'aide d'outils d'analyse comme le logiciel du microscope Keyence, on étudiera ce profil d'usure, ce qui permettra d'obtenir des informations précieuses sur l'efficacité de l'outil et la qualité de la coupe. Les paramètres de mesure du profil que nous considérerons dans la suite de l'étude sont présentés à la Figure 4-2.

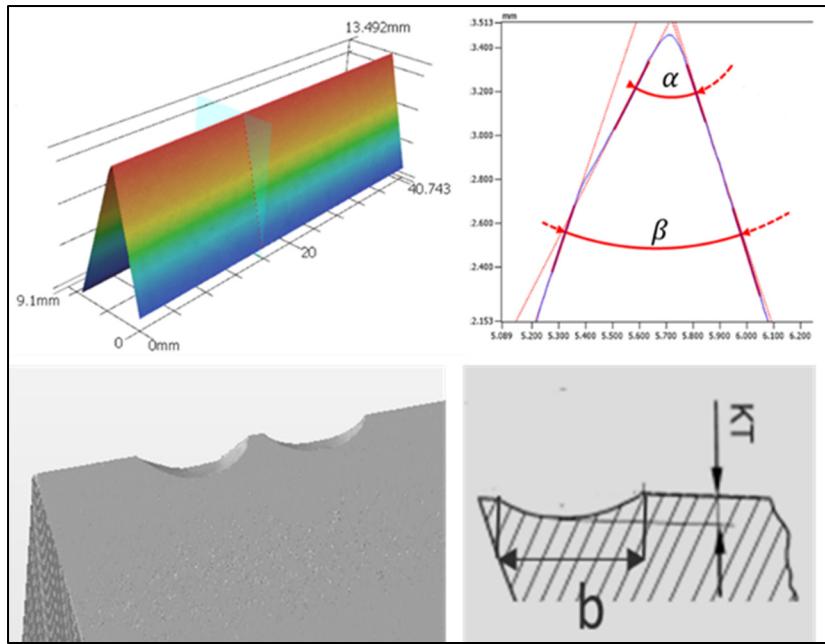


Figure 4-2 Paramètres de mesure du profil d'arête :
 α - angle de pointe d'outil, β - angle d'arête de coupe,
 KT -profondeur d'usure, b - largeur d'usure

4.3 Étude de l'usure des outils en fonction du temps : Étude de cas

4.3.1 Description de l'étude expérimentale

Cette étude expérimentale vise à évaluer l'usure des couteaux d'équarrisseur en utilisant une approche de mesure de profil et d'estimation du volume perdu. Pour ce cas, nous considérerons uniquement les couteaux faits en acier A8 modifié avec 1 % de tungstène, Acier le plus utilisé par Dk-Spec. Les couteaux seront numérisés avant leur utilisation et après des périodes spécifiques d'utilisation, totalisant 100 heures. L'évaluation de l'usure se fera en analysant les numérisations obtenues à l'aide du microscope haute résolution et en comparant les profils avant et après usure. L'étude permettra également d'observer l'évolution de l'usure au fil du temps.

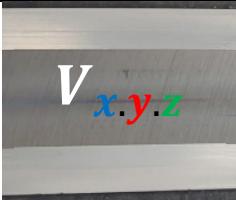
Tout d'abord, deux lots de couteaux identifiés nous ont été fournis par le partenaire industriel, puis ont été numérisés au microscope :

- Lot #1 (V1) – contiens 4 échantillons (acier A8 modifié avec 1 % de tungstène) sans revêtement et une arête coupée
- Lot #2 (V2) – contiens 4 échantillons (acier A8 modifié avec 1 % de tungstène) avec revêtement et une arête coupée

N. B. Pour faciliter la tâche à l'opérateur et pour éviter des confusions une arête de coupe a été coupée lors de la production

Ensuite, les échantillons numérisés ont été utilisés dans des conditions réelles en étant montés sur deux têtes d'équarrisseurs distinctes, une pour les couteaux non revêtus et une autre pour les couteaux revêtus. Pendant une semaine, les couteaux ont été soumis à des conditions de travail régulières, et des échantillons ont été prélevés à des intervalles de 24 heures pour évaluer leur niveau d'usure (par exemple, V1.1.28H pour celui ayant travaillé 28h, V1.2.52H pour celui ayant travaillé 52h, V1.3.76H pour celui ayant travaillé 76h, V1.4.100H pour celui ayant travaillé 100h). Cette procédure a été répétée pour les échantillons revêtus. Le Tableau 4-1 présente l'identification des échantillons de couteau. Une fois que les couteaux ont atteint la plage horaire souhaitée, ils ont été à nouveau numérisés et les numérisations ont été enregistrées pour une analyse ultérieure. Enfin, la comparaison entre les numérisations avant et après usure permet de calculer le volume perdu et de déterminer le profil d'usure des couteaux.

Tableau 4-1 Identification des échantillons de couteaux

					
Lot (x)	Quantité (y)	Usinage + Polissage + Traitement thermique	Revêtement (coating)	Identification initiale (Vx.y)	Identification finale (Vx.y.z)
V1	5	✓		V1.1 ; V1.2 ; V1.3 ; V1.4	V1.1.28H; V1.2.52H; V1.3.76H; V1.4.100H
V2	5	✓	✓	V2.1 ; V2.2 ; V2.3 ; V2.4	V2.1.28H; V2.2.52H; V2.3.76H; V2.4.100H

4.3.2 Quantification du volume perdu par usure

4.3.3 Mesure du profil

La mesure de profil est une méthode utilisée pour observer l'état d'usure des couteaux à différentes périodes d'utilisation. Cette méthode consiste à analyser la surface des couteaux à l'aide du microscope. Les couteaux sont numérisés après leur utilisation dans le but de visualiser les changements dans la forme, les dimensions et les caractéristiques de surface des couteaux, révélant ainsi l'usure accumulée au fil du temps. Ces mesures de profil fournissent des informations précieuses sur l'évolution de l'usure et permettent d'identifier les zones les

plus touchées par l'usure comme présentées à la Figure 4-3. Le Tableau 4-2 résume les résultats obtenus après cette mesure de profil.

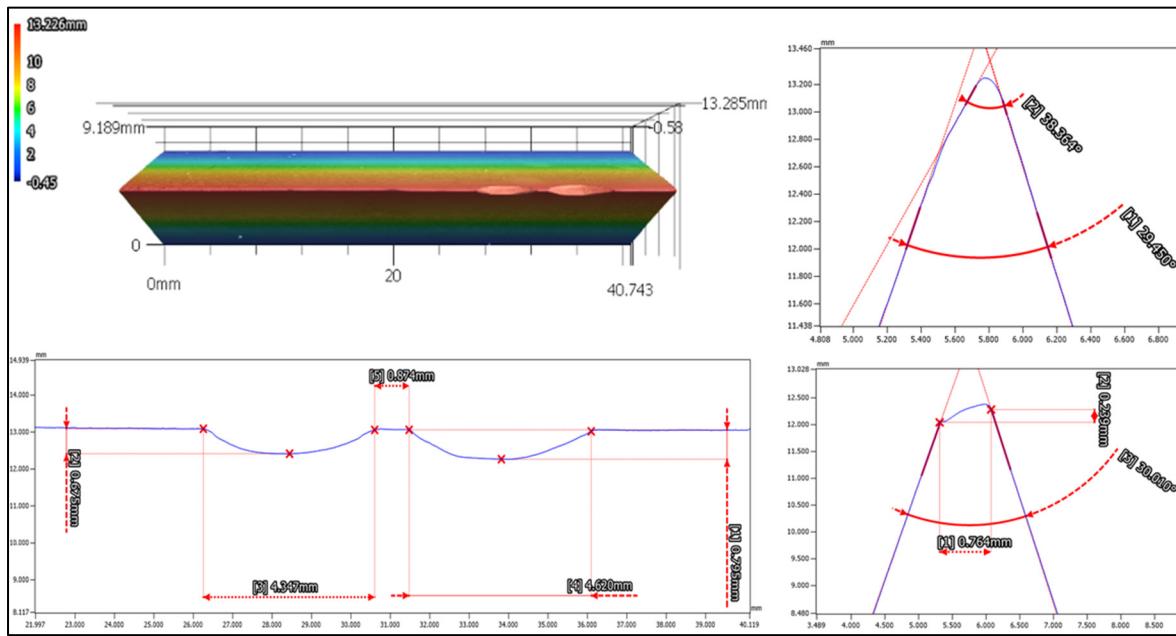


Figure 4-3 Mesure du profil

Tableau 4-2 Résultats des paramètres obtenus après mesure de profil

Temps de travail (h)	Echantillon ID	KT (mm)	b (mm)	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
28	V1.1	-	-	39.953	29.646
	V2.1	0.599	6.441	38.198	29.413
52	V1.2	-	-	39.451	29.79
	V2.2	-	-	42.461	30.207
76	V1.3	-	-	39.33	30.421
	V2.3	0.185	3.375	40.141	30.249
100	V1.4	0.795	4.62	38.364	29.45
	V2.4	-	-	39.892	30.608

4.3.4 Volume de matière perdu

Le volume perdu est utilisé comme un indicateur de l'usure des couteaux. Il est calculé en faisant la différence entre le volume initial des couteaux avant leur utilisation et le volume final après une période donnée d'utilisation. Cette mesure permet d'évaluer la quantité de matière qui a été perdue et due à l'usure. Le calcul du volume perdu est réalisé à l'aide de Matlab et Python en exportant les fichiers STL-3D fourni par le logiciel du microscope. La Figure 4-4 présente la computation volumique de l'arête de coupe avant et après usure à l'aide du logiciel Matlab et le Tableau 4-3, les résultats relatifs au volume de matière perdu pour chaque échantillon.

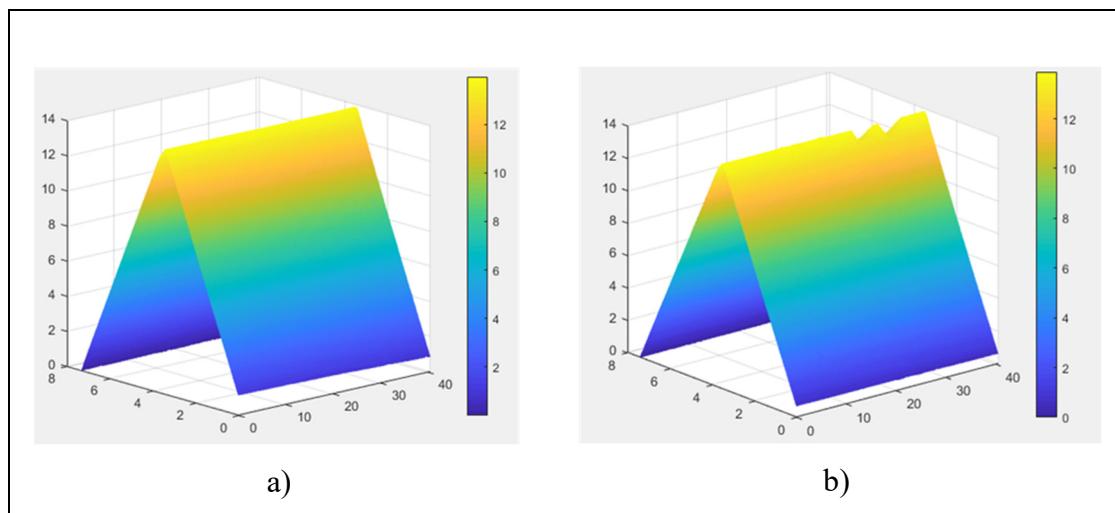


Figure 4-4 Computation de l'arête avec Matlab. a) avant usure b) après usure

Tableau 4-3 Résultats de la mesure des volumes des arêtes de coupes

Temps de travail (h)	Identifiant de l'échantillon	Volume avant usure (mm ³)	Volume après usure (mm ³)	Volume de matière perdu (mm ³)
28	V1.1	2600.52	2595.28	5.23
	V2.1	2603.99	2590.51	13.48
52	V1.2	2593.88	2574.00	19.88
	V2.2	2596.55	2588.54	8.01
76	V1.3	2571.81	2539.27	32.54
	V2.3	2588.04	2577.65	10.39
100	V1.4	2595.52	2574.38	21.14
	V2.4	2606.08	2579.43	26.65

L'observation des résultats montre qu'entre 28 heures et 76 heures, on observe une variation significative du taux d'usure entre les couteaux non revêtus et entre 52 heures et 100 heures les couteaux revêtus. En général, le taux d'usure des couteaux non revêtus est plus élevé que celui des couteaux revêtus. Cependant, à 28 heures et à 100 heures, on observe une inversion de cette tendance. Cette variation non uniforme du taux d'usure peut être attribuée en partie à l'arrachement de matière causé par la présence d'intrus telle que des particules de sable sur les billes de bois à transformer. De plus, on remarque la fragilité de l'arête de coupe aux endroits où l'arrachement de matière se produit. Certains couteaux ont également subi des déformations en raison de chocs avec des particules présentes sur le bois.

4.3.5 Volume perdu par usure en excluant les écaillages

Par souci d'évaluation de l'usure des couteaux en considérant les zones usées et non écaillées, un calcul du volume perdu a été effectué en se concentrant sur une zone spécifique de 5 mm de l'arête de coupe de l'outil. Cette zone correspond à la partie de l'outil usé par abrasion lors de l'usinage. En mesurant la différence de volume avant et après l'usure, il est possible d'estimer

la quantité de matière perdue au niveau de cette zone spécifique. La Figure 4-5 matérialise bien la zone considérée.

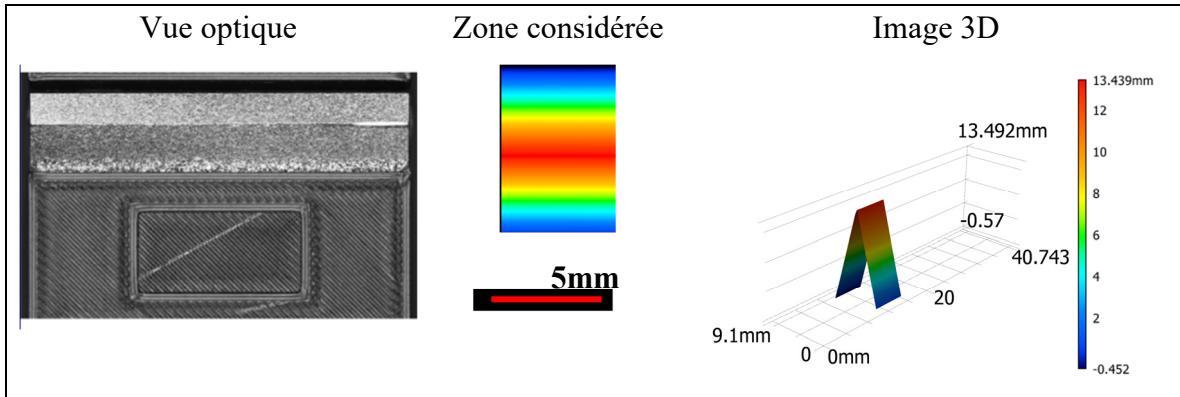


Figure 4-5 Zone spécifique délimitée pour l'estimation du volume perdu

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4-4 et représentés graphiquement à la Figure 4-6 illustrant l'évolution de l'usure des couteaux, qu'ils soient revêtus ou non, pour l'acier A8 mod+1%W, en fonction du temps.

Tableau 4-4 Résultats de la mesure des volumes des arêtes de coupe sur une zone spécifique

Temps de travail (h)	Identifiant de l'échantillon	Volume avant usure (mm^3)	Volume après usure (mm^3)	Perte de volume (mm^3)
28	V1.1	302.28	299.24	3.04
	V2.1	310.92	307.80	3.13
52	V1.2	302.34	297.58	4.76
	V2.2	310.57	305.38	5.19
76	V1.3	305.56	296.65	8.91
	V2.3	310.74	303.22	7.52
100	V1.4	302.28	291.30	10.98
	V2.4	311.43	303.41	8.02

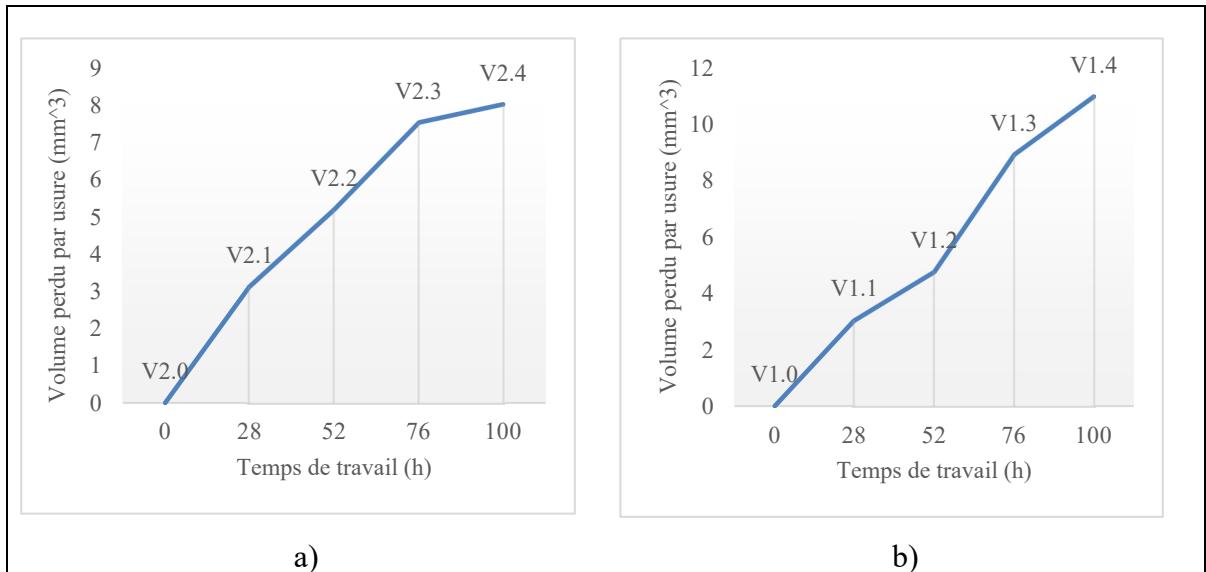


Figure 4-6 Usure des couteaux d'équarrisseuses en fonction du temps a) couteaux revêtus, b) couteaux non revêtus

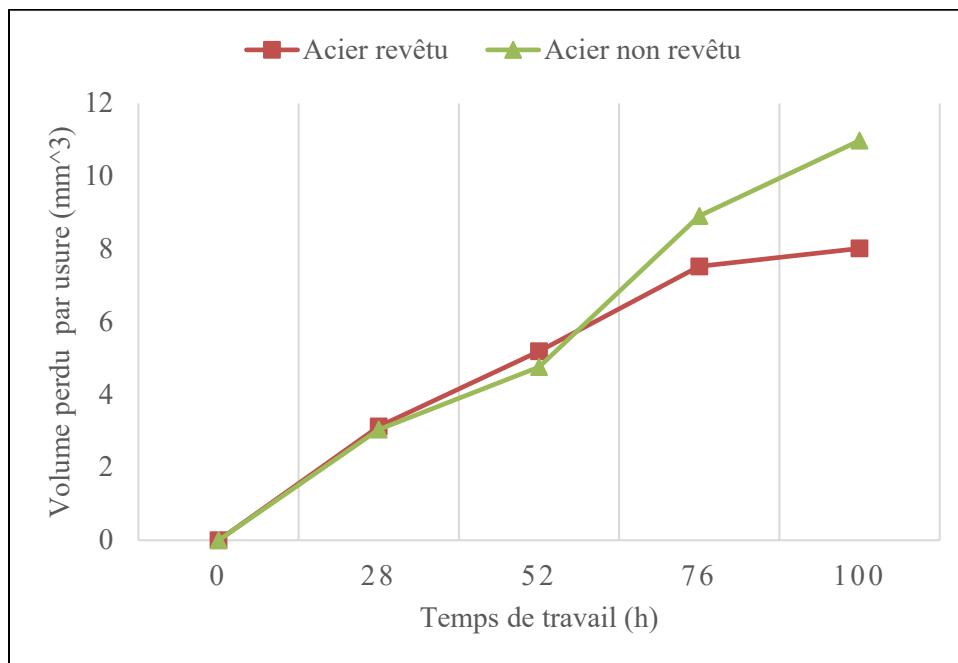


Figure 4-7 Comparaison de l'usure des couteaux revêtus et non revêtus

Lorsqu'on examine le volume perdu par usure en fonction du temps (de 28h à 100h), en excluant les parties arrachées (Figure 4-7), c'est-à-dire les 5 premiers millimètres de l'arête de

coupe, on observe que l'usure croît de manière similaire pour les couteaux revêtus et non revêtus au cours des 52 premières heures. Ensuite, l'usure devient plus marquée pour les couteaux non revêtus. Cette observation suggère que le revêtement appliqué sur les couteaux permet de prolonger leur durée de vie et de réduire l'usure à long terme.

4.4 Évaluation de l'usure pour trois aciers à outils spécifiques

4.4.1 Aciers à outils de l'expérience

Dans le cadre de cette expérience visant à comparer l'usure, trois types d'aciers à outils ont été sélectionnés pour être soumis à une évaluation sur une période d'une semaine, soit 124 heures. Les aciers choisis présentent des caractéristiques distinctes en termes de composition chimique, de dureté et de résistance à l'usure. Cela permettra d'analyser leur performance respective et de déterminer lequel offre la meilleure résistance à l'usure lorsqu'il est utilisé pour la coupe du bois. Cette comparaison approfondie nous permettra d'identifier l'acier à outils le plus approprié pour optimiser la durabilité et l'efficacité des outils de coupe dans des conditions d'utilisation réelles.

Le premier est l'acier A8 modifié contenant 1% de tungstène, qui est largement utilisé par le partenaire industriel. Le deuxième est l'acier A8 modifié contenant un faible pourcentage de tungstène, provenant du fournisseur Böhler. Enfin, le troisième est l'acier W360, qui est utilisé par le partenaire industriel pour une autre application. Les compositions chimiques des aciers à outils de l'expérience sont consignées dans le Tableau 3-1.

4.4.2 Protocole expérimental

L'évaluation de l'usure des couteaux pour chaque type d'acier suit la même procédure que celle utilisée pour l'évolution de l'usure en fonction du temps. La seule différence réside dans le fait que cette fois-ci, les couteaux sont regroupés par lots de trois pour chaque type d'acier, à la fois avec et sans revêtement. De plus, la durée de mise en utilisation des couteaux est fixée à 124 heures pour tous les échantillons. Cette approche permettra de comparer de manière plus

précise et équitable l'usure des couteaux en fonction de l'acier utilisé, tant avec le revêtement qu'en l'absence de revêtement. Les résultats obtenus permettront de déterminer les performances relatives de chaque type d'acier et d'évaluer leur résistance à l'usure dans des conditions de coupe du bois réelles.

4.4.3 Mesure et évaluation de l'usure pour chaque acier

Les résultats de la mesure de volume perdu pour chaque type d'acier sont présentés dans le Tableau 4-5 où le volume de matière perdu fait référence à la perte sur toute l'arête de coupe, tandis que le volume perdu par usure concerne spécifiquement la perte sur une zone définie, en excluant les parties qui ont été arrachées.

Tableau 4-5 Volume perdu des aciers

Condition	Acier	Nombre d'échantillons	Volume de matière perdu (mm^3)	Volume perdu par usure (mm^3)
Acier revêtu	A8 mod +1%W	3	44.54 ± 21.18	2.26 ± 1.72
	A8 mod +0%W	3	15.09 ± 1.71	2.24 ± 0.83
	W360	3	15.48 ± 2.96	1.68 ± 1.14
Acier non revêtu	A8 mod +1%W	3	21.28 ± 6.77	3.49 ± 0.49
	A8 mod +0%W	3	34.99 ± 19.7	2.99 ± 1.4
	W360	3	18.66 ± 5.29	3.01 ± 1.69

4.4.4 Acier A8 mod +1%W

Les résultats de l'évaluation de l'usure des couteaux à base de l'acier A8 mod + 1%W révèlent plusieurs informations importantes. Tout d'abord, l'observation visuelle (Figure 4-8) des arrachements de matières sur certains couteaux revêtus, dus à l'état du bois usiné, suggère une fragilité de ces échantillons. Cela indique que l'acier A8 mod + 1%W revêtu peut présenter des limitations en termes de résistance à l'usure dans des conditions spécifiques, notamment lorsqu'il est exposé à des matériaux d'usinage difficiles.

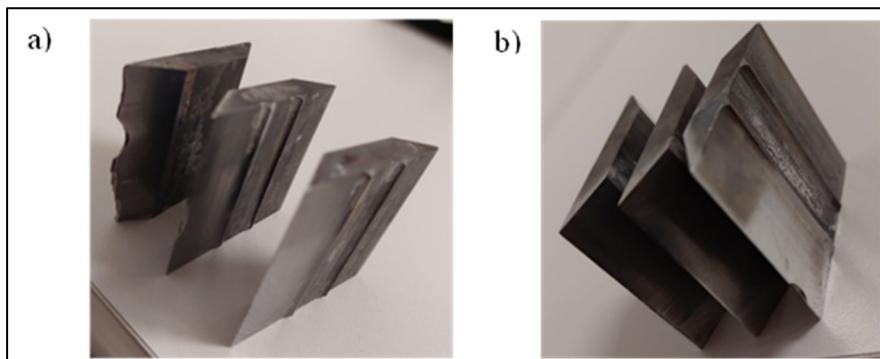


Figure 4-8 Couteaux usés pour l'acier A8 mod + 1%W
a) revêtus et b) non revêtus

D'autre part, en examinant uniquement la partie usée par abrasion des couteaux (comme présentée à la Figure 4-5), d'autres résultats montrent que l'usure est moins importante pour les aciers revêtus que pour les aciers non revêtus. Cela suggère que le revêtement appliqué sur les couteaux peut offrir une meilleure résistance à l'usure et prolonger leur durée de vie dans des environnements abrasifs. La Figure 4-9-a présente les résultats obtenus après la mesure du volume de matière perdu correspondant au volume perdu par usure en considérant toute l'arête de coupe et la Figure 4-9-b le volume perdu par usure sur une zone spécifique en excluant les parties arrachées.

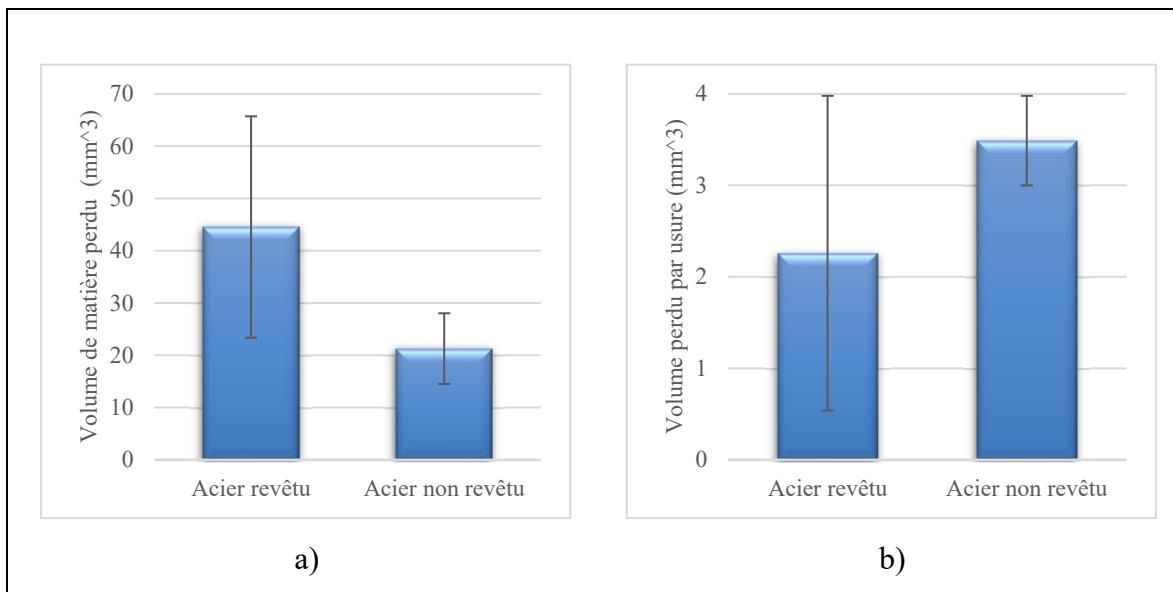


Figure 4-9 Volume perdu pour le A8 mod + 1%W a) Volume de matière perdu et b) Volume perdu par usure

En combinant ces deux observations, on peut conclure que bien que l'acier A8 mod + 1%W revêtu puisse présenter une certaine fragilité lorsqu'il est exposé à des conditions d'usinage difficiles, le revêtement offre une protection supplémentaire contre l'usure par abrasion. Par conséquent, il pourrait être considéré comme un compromis intéressant entre la résistance au choc et la résistance à l'usure, en fonction des exigences spécifiques de l'application.

4.4.5 Acier A8 mod +0%W

Les résultats de l'évaluation de l'usure des couteaux à base de l'acier A8 mod + 0%W révèlent plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, l'observation visuelle des arrachements de matières sur certains couteaux non revêtus (Figure 4-10-b), dus à l'état du bois usiné, suggère une fragilité de ces échantillons. Cela indique que l'acier A8 mod + 0%W non revêtu peut présenter des limitations en termes de résistance à l'usure et peut être plus susceptible de subir des dommages ou des défaillances lorsqu'il est exposé à des matériaux d'usinage difficiles.

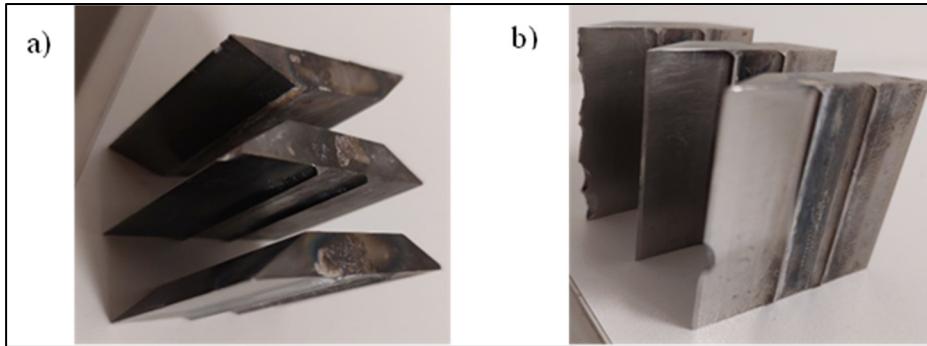


Figure 4-10 Couteaux usés pour l'acier A8 mod + 0%W
a) revêtus et b) non revêtus

D'autre part, en examinant uniquement la partie usée par abrasion des couteaux, d'autres résultats présentés à la Figure 4-11-b, indiquent que l'usure est moins importante pour les aciers revêtus que pour les aciers non revêtus. Cela suggère que les couteaux en acier A8 mod + 0%W revêtus offrent une certaine résistance à l'usure dans des environnements abrasifs. En combinant ces observations (Figure 4-11), on peut conclure que les couteaux en acier A8 mod + 0%W non revêtus peuvent être sujet à la fragilité et aux arrachements de matières lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions d'usinage difficiles.

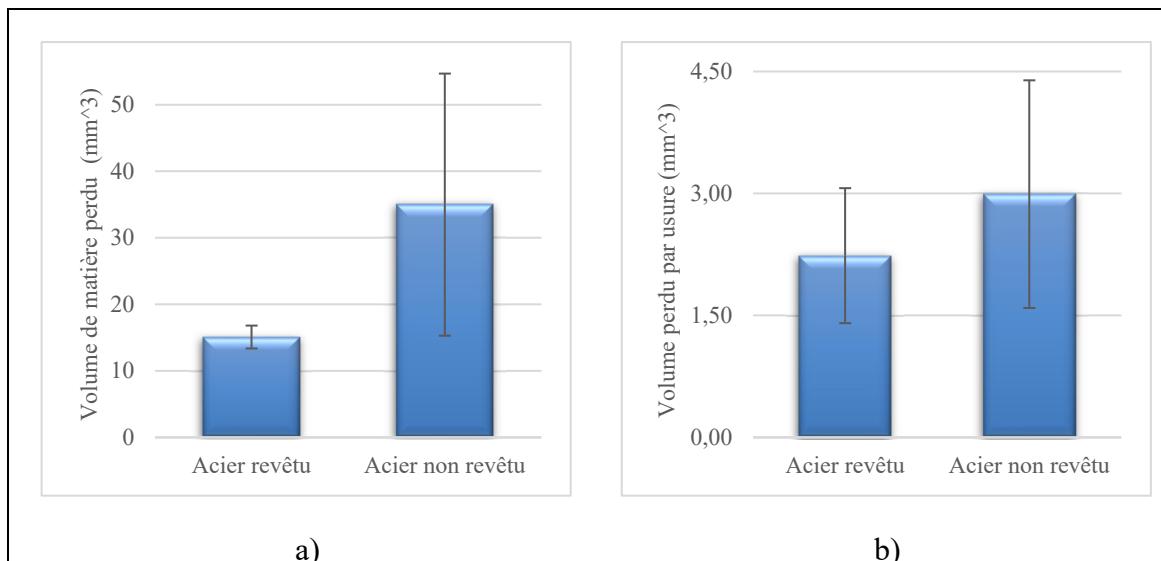


Figure 4-11 Volume perdu pour le A8 mod + 0%W a) Volume de matière perdu et b) Volume perdu par usure

4.4.6 Acier W360

L'évaluation de l'usure des couteaux en acier W360 révèle des arrachements de matières légères (Figure 4-12), indiquant une certaine fragilité de certains échantillons. Cependant, lorsqu'on considère la partie usée par abrasion ou la totalité de l'arête usée (Figure 4-13), on constate que les couteaux revêtus en acier W360 présentent une usure moins importante que les couteaux non revêtus. Cela suggère que le revêtement appliqué sur l'acier améliore sa résistance à l'usure dans des environnements abrasifs.

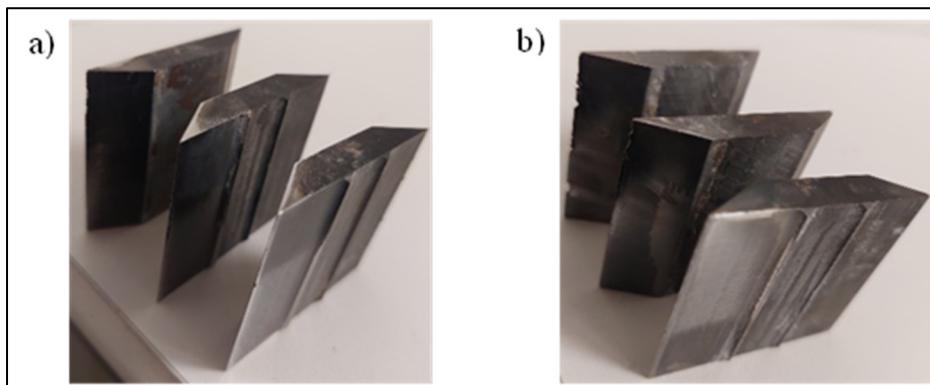


Figure 4-12 Couteaux usés pour l'acier W360
a) revêtus et b) non revêtus

En résumé, bien que certains couteaux en acier W360 puissent montrer une fragilité avec des arrachements de matières, l'utilisation d'un revêtement permet d'améliorer la résistance à l'usure de cet acier. Les couteaux revêtus en acier W360 offrent ainsi une meilleure durabilité et une performance supérieure dans des conditions d'usinage abrasives.

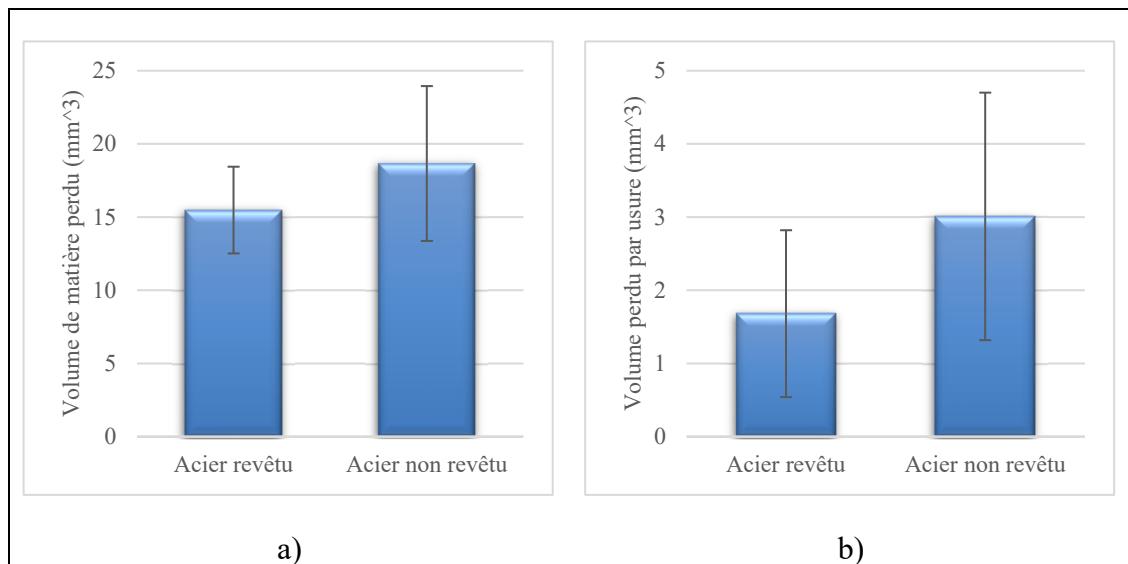


Figure 4-13 Volume perdu pour le W360 a) Volume de matière perdu et b) volume perdu par usure

4.4.7 Analyse comparative des résultats

L'observation visuelle des couteaux et du volume de matière perdu (Figure 4-14) révèlent des arrachements de matières plus importants sur les couteaux en acier A8 mod + 1%W revêtus, suggérant leur fragilité par rapport aux couteaux non revêtus. À l'inverse, les couteaux en acier A8 mod + 0%W non revêtus présentent également des arrachements de matières, mais de manière moins prononcée. Les couteaux en acier W360, qu'ils soient revêtus ou non revêtus, montrent des arrachements de matières légers, indiquant une meilleure résistance à l'usure que les couteaux en acier A8 mod + 0%W et A8 mod + 1%W.

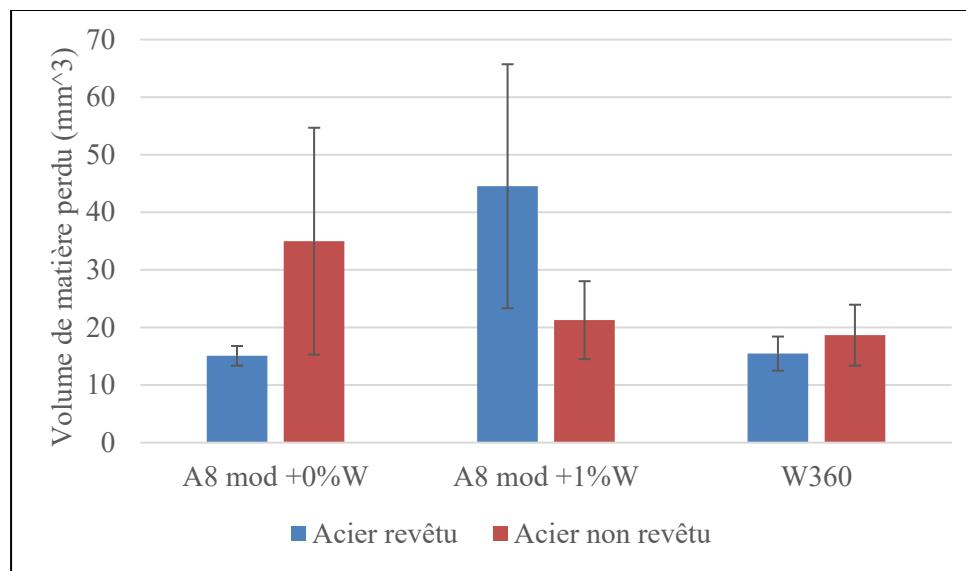


Figure 4-14 Histogramme des volumes de matière perdus en fonction du type d'acier

Cependant, lorsqu'on se focalise sur la partie usée par abrasion (Figure 4-15), une tendance différente se dessine. Les couteaux revêtus en acier W360, A8 mod + 1%W et A8 mod + 0%W montrent une usure moins prononcée que leurs homologues non revêtus. Ces résultats suggèrent que l'application d'un revêtement améliore la résistance à l'usure des couteaux en acier. Ainsi, les couteaux revêtus en acier W360 offrent la meilleure résistance à l'usure. Ces observations mettent en évidence l'importance du revêtement dans la performance et la durabilité des couteaux en acier.

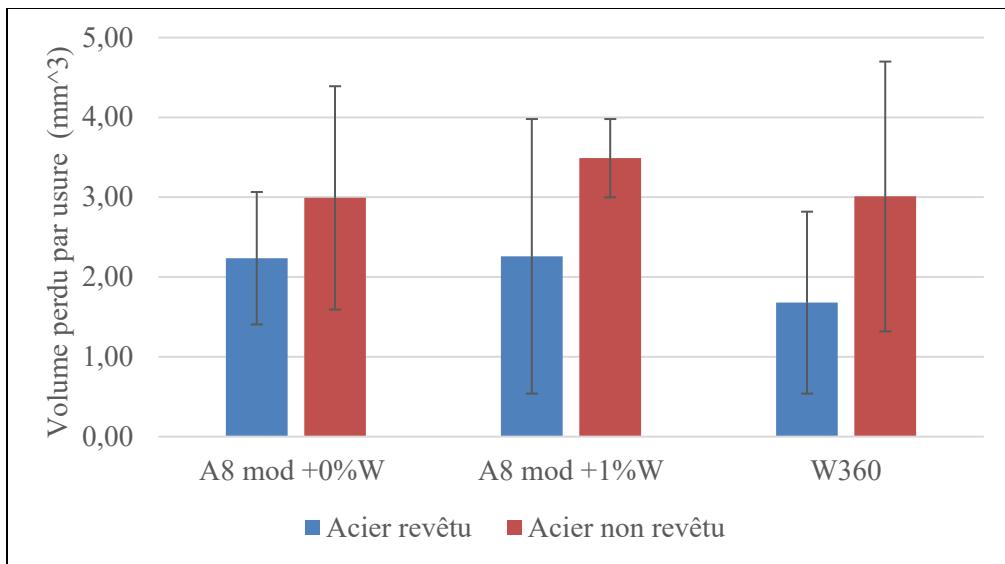


Figure 4-15 Histogramme des volumes perdus par usure en fonction du type d'acier

En conclusion, l'observation visuelle et du volume de matière perdu mettent en évidence des différences dans les arrachements de matières entre les différents aciers testés. Cependant, l'analyse de l'usure par abrasion indique que les couteaux revêtus présentent une meilleure résistance à l'usure que les couteaux non revêtus, indépendamment de la composition de l'acier.

4.5 Analyse statistique

Cette étude vise à évaluer la résistance à l'usure des couteaux d'équarrisseur en mesurant la perte de volume après 124 heures de travail. La variable dépendante, VER, représente cette perte de volume en mm^3 . L'objectif principal est de déterminer s'il existe une différence significative dans la perte de volume entre trois types d'alliages différents (A0 pour l'acier A8mod+0%W, A1 pour l'acier A8mod+1%W et W pour l'acier W360) sous deux conditions de revêtement distinctes (R pour revêtu et N pour non revêtu). Ainsi, nous avons deux facteurs d'intérêt : le type d'alliage avec trois niveaux (A0, A1, W) et la condition de revêtement avec deux niveaux (R, N). Ces niveaux sont quantitatifs et fixes.

Pour l'expérience, deux échantillons ($n = 2$ répétitions) de chaque combinaison de facteurs seront utilisés, ce qui donne un total de 12 échantillons. L'ordre de vérification de ces échantillons sera complètement randomisé pour éliminer tout biais potentiel. Le niveau de signification choisi pour cette analyse est de 5%, indiquant notre seuil pour déterminer si les différences observées sont statistiquement significatives. Les données sont dans le Tableau 4-6.

Tableau 4-6 Tableau de donnée pour l'ANOVA

Echantillon	A0		A1		W	
	R	N	R	N	R	N
1	16.67	15.49	26.23	30.14	12.52	27.30
2	16.91	15.11	22.50	25.72	12.50	19.63

L'analyse de variance à deux facteurs (ANOVA à deux facteurs) sera utilisée pour analyser les données. Cette méthode nous permettra de comprendre non seulement l'effet de chaque facteur individuellement (l'alliage et la condition de revêtement) sur la perte de volume, mais aussi de déterminer si une interaction significative existe entre ces deux facteurs.

4.5.1 Définitions des hypothèses

Les hypothèses peuvent être définies comme suit :

- Hypothèses pour le Facteur Alliage
 - Hypothèse nulle (H_0) : Il n'y a pas de différence significative dans la perte de volume entre les différents types d'alliage (A0, A1, W).
 - Hypothèse alternative (H_1) : Il existe une différence significative dans la perte de volume entre au moins deux types d'alliage.
- Hypothèses pour le Facteur Revêtement
 - Hypothèse nulle (H_0) : Il n'y a pas de différence significative dans la perte de volume entre les conditions de revêtement (R pour revêtu et N pour non revêtu).

- Hypothèse alternative (H1) : Il existe une différence significative dans la perte de volume entre les conditions de revêtement.
- Hypothèses pour l'Interaction entre Alliage et Revêtement
 - Hypothèse nulle (H0) : Il n'y a pas d'interaction significative entre le type d'alliage et la condition de revêtement sur la perte de volume.
 - Hypothèse alternative (H1) : Il existe une interaction significative entre le type d'alliage et la condition de revêtement sur la perte de volume.

4.5.2 Analyse de la Variance (ANOVA)

L'analyse de la variance sur les données du Tableau 4-6 donne les résultats compilés dans le Tableau 4-7. Les détails complets de cette analyse sont consignés dans l'ANNEXE V.

Tableau 4-7 Récapitulatif de l'analyse de la variance

Source	DL	Contribution	Valeur F	Valeur de p
Alliage	2	52.87%	15.17	0.005
Condition	1	16.82%	9.65	0.021
Alliage*Condition	2	19.86%	5.70	0.041
Erreur	6	10.45%		
Total	11	100.00%		

Afin de tester l'hypothèse nulle H0 pour chaque facteur, l'utilisation de la statistique de Fisher est idéale. Elle nous permet de comparer la valeur calculée de F (F_{test}) avec la valeur théorique de F ($F_{\text{théorique}}$). Cette dernière est obtenue à partir de la table de Fisher, qui est consignée dans l'ANNEXE VI. Les valeurs théoriques correspondantes à chaque source de variation sont précisées dans le Tableau 4-8.

Tableau 4-8 Valeurs théorique de F

Source	Alliage	Condition	Alliage*Condition
$F_{théorique}$	$F_{0.95,2.6} = 5.14$	$F_{0.95,1.6} = 5.99$	$F_{0.95,2.6} = 5.14$

Puisque dans tous les cas nous avons $F_{test} > F_{théorique}$ l'hypothèse nulle est donc rejetée pour les deux facteurs (Alliage et conditions de revêtement) et pour l'interaction (Alliage*Condition), cela indique que l'alliage et les conditions de revêtement (revêtu ou non) ont un effet significatif de 5% sur la perte de volume, et que l'effet d'un facteur dépend de l'autre facteur.

4.6 Discussion des résultats

La méthodologie de quantification d'usure mise en œuvre dans cette étude est robuste et permet une analyse détaillée de l'usure des aciers à outils. Les numérisations avant et après l'usure fournissent une représentation claire et précise de l'état des couteaux à différentes étapes de leur utilisation, permettant ainsi une comparaison détaillée de l'usure survenant au cours du temps. Elle est semi-automatique, ce qui implique une réduction des erreurs humaines et une augmentation potentielle de la reproductibilité des mesures. De manière cruciale, cette méthode englobe toute l'arête, fournissant ainsi une représentation plus holistique de l'usure. Des informations supplémentaires, telles que le volume perdu et le profil d'usure, peuvent également être extraites, offrant une compréhension plus approfondie de la dynamique et de la sévérité de l'usure. De plus, le caractère non destructif de cette méthodologie est particulièrement avantageux, préservant l'échantillon pour des analyses futures.

Il convient de souligner que si nous avions utilisé la méthode habituelle de mesure point par point (Shyamal C. Ghosh et al., 2015) ou de la mesure directe de la géométrie de l'outil [(Porankiewicz et al., 2005),(Sheikh-Ahmad et al., 2003),(McKenzie & Karpovich, 1975)], en se basant sur des coupes transversales de couteaux usés, nous n'aurions pas été en mesure de considérer la totalité de l'arête usée, ce qui pourrait conduire à une sous-estimation ou une

surestimation de l'usure, étant donné l'hétérogénéité potentielle de l'usure le long de l'arête. Un autre inconvénient majeur de cette méthode est sa nature destructrice, nécessitant une découpe de l'échantillon. Cela non seulement compromet l'intégrité de l'échantillon pour des études ultérieures, mais augmente également le temps et les coûts associés à la préparation de l'échantillon. Cette approche ne nous aurait donc pas permis d'obtenir une analyse approfondie de l'usure des aciers à outils.

Les résultats obtenus sur l'usure des outils en fonction du temps montrent clairement une augmentation de l'usure avec le temps, avec des différences notables entre les couteaux revêtus et non revêtus. Les couteaux non revêtus présentent généralement un taux d'usure plus élevé, bien que des variations non uniformes soient observées, probablement dues à des variations dans les conditions d'usinage et la présence d'impuretés dans le bois, comme des particules de sable (Heidari, 2019).

Par ailleurs, l'analyse du volume de matière perdu (Figure 4-6-b) montre une augmentation significative de l'usure entre 28 et 76 heures pour les couteaux non revêtus. Les revêtements semblent offrir une protection contre l'usure par abrasion, suggérant leur utilité pour prolonger la durée de vie des outils dans des environnements abrasifs (Aramcharoen, Mativenga, Yang, Cooke, & Teer, 2008). Cependant, la présence d'arrachements de matières sur certains couteaux revêtus suggère une fragilité potentielle dans des conditions d'usinage difficiles.

L'évaluation comparative des trois aciers à outils révèle des différences significatives dans la résistance à l'usure. L'acier A8 modifié avec 1% de tungstène, bien qu'il présente des arrachements de matières suggérant une fragilité, montre une usure moins importante dans la partie usée par abrasion lorsqu'il est revêtu, indiquant l'efficacité du revêtement pour améliorer la résistance à l'usure. De plus, l'acier A8 modifié avec 0% de tungstène présente également des limitations en termes de résistance à l'usure, en particulier dans l'état non revêtu. Les résultats indiquent que les revêtements peuvent offrir une protection significative contre l'usure par abrasion, même dans des aciers potentiellement plus fragiles. Enfin, l'acier W360, avec ou sans revêtement, présente une meilleure résistance à l'usure que les aciers A8 modifiés, avec

des arrachements de matières légers et une usure moins prononcée dans la partie usée par abrasion pour les couteaux revêtus. Cela suggère que l'acier W360, en particulier lorsqu'il est revêtu, pourrait offrir la meilleure durabilité et performance dans des conditions d'usinage abrasives.

En conclusion, cette étude offre une analyse approfondie et détaillée de l'usure des aciers à outils pour l'usinage du bois. Les résultats montrent clairement l'importance des revêtements pour améliorer la résistance à l'usure des couteaux, même dans des conditions d'usinage difficiles et avec des aciers plus fragiles (Faga & Settineri, 2006). Cela suggère que le choix de l'acier et l'utilisation de revêtements appropriés sont cruciaux pour optimiser la durée de vie des outils et la qualité du produit final.

4.7 Conclusion

En conclusion, la méthodologie de quantification de l'usure des couteaux d'équarrisseur présentée dans cette étude s'est avérée efficace pour évaluer l'usure, observer l'usure en fonction du temps ainsi que de comparer les résultats pour trois différents aciers. L'utilisation du microscope à haute résolution a permis d'obtenir des mesures précises du volume perdu et des profils d'usure des couteaux. L'évaluation a été réalisée sur une plage de 124 heures d'utilisation, en prenant en compte différents types d'aciers à outils et en comparant les couteaux avec et sans revêtement. Cette approche a permis d'observer des variations significatives du taux d'usure entre les différents aciers et de détecter les zones les plus touchées par l'usure. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des performances des couteaux d'équarrisseur, en permettant de choisir les matériaux et les revêtements les plus adaptés. En outre, cette méthodologie peut être appliquée à d'autres domaines de l'industrie de l'usinage du bois pour évaluer et améliorer la durabilité des outils de coupe.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES D'USURE ABRASIVE

5.1 Introduction

L'industrie de la transformation primaire du bois nécessite des outils dotés de propriétés mécaniques exceptionnelles pour assurer une production efficace et durable. En particulier, la résistance à l'usure est une propriété essentielle pour les aciers utilisés dans cette industrie. La résistance à l'usure garantit une longue durée de vie de l'outil même dans des conditions d'utilisation intensives. Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les trois aciers à outil suivant : A8 mod+ 1%W, A8 mod+ 0%W et le W360. En tenant compte de leurs différences en termes de composition chimique, nous évaluerons leurs performances en matière de résistance à l'usure. L'objectif principal est de déterminer quel acier offre la meilleure propriété en termes de résistance à l'usure abrasive. Cette évaluation aidera les professionnels de l'industrie à faire un choix éclairé, optimisant ainsi la durabilité et l'efficacité de leurs outils.

5.2 Résultats des tests d'usure

Des essais d'usure ont été conduits chez DK-SPEC en utilisant une machine d'essai d'abrasion équipée d'une roue en caoutchouc, en conformité avec la norme ASTM G65. Étant donné que les échantillons testés présentent une résistance à l'abrasion allant de moyenne à extrême, nous avons sélectionné la procédure A de la norme susmentionnée.

Les échantillons pour les tests sont conformes aux spécifications de la norme ASTM G65, c'est-à-dire qu'ils sont rectangulaires, mesurant 25 x 76 mm, avec une épaisseur pouvant varier de 3.2 à 12.7 mm. Pour cette série d'essais, nous avons choisi des échantillons d'une épaisseur de 3.2 mm. Dans le cadre de la procédure expérimentale, chaque échantillon a été soigneusement pesé avant le début de l'essai à l'aide d'une balance d'une précision de 1mg. L'essai a été réalisé en tranches de 1000 cycles pour suivre l'évolution de l'usure. Après chaque

tranche de 1000 cycles, qui correspond à une durée de 5 minutes, la masse de chaque échantillon a été à nouveau mesurée pour estimer la perte de masse. Il est important de noter que le volume perdu par échantillon pour chaque type d'acier à outil ayant dépassé les 100mm^3 , nous avons opté pour la procédure B, qui est une variante à court terme de la procédure A. Les résultats obtenus pour chaque type d'acier sont présentés ci-après:

5.2.1 Acier A8 mod+0% W

En suivant la procédure A de la norme ASTM G65, nous avons obtenu les résultats des essais d'usure pour l'acier A8 modifié avec 0% de tungstène (W). La Figure 5-1-a illustre la trace d'usure observée tous les 1000 cycles de la roue. De son côté, la Figure 5-1-b montre l'évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles de la roue.

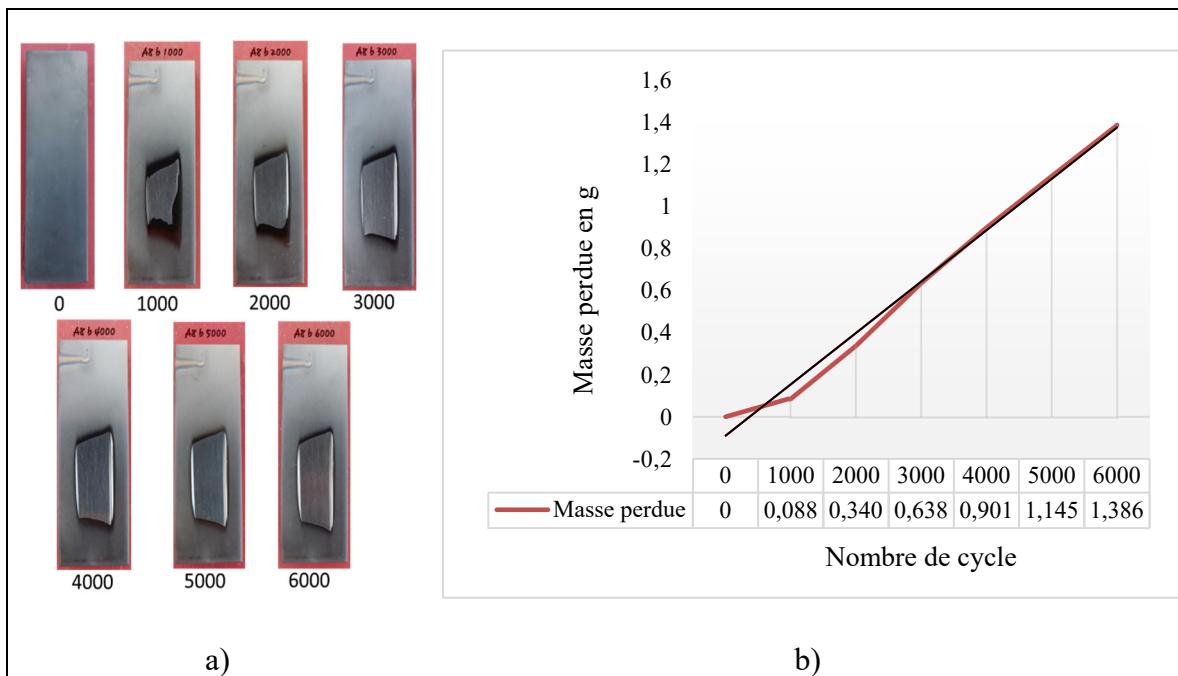


Figure 5-1 Acier A8 mod+0%W revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

Les résultats pour l'acier A8 mod+0%W non revêtu quant à eux sont présentés à la Figure 5-2.

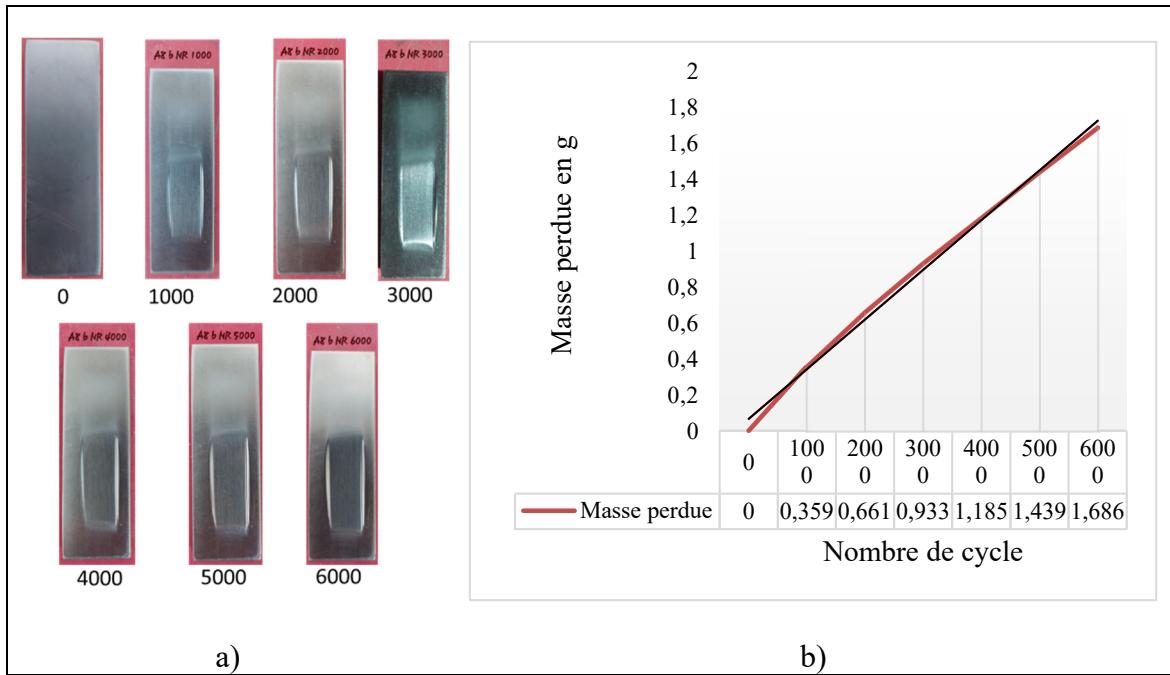


Figure 5-2 Acier A8 mod+0%W non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

En examinant l'évolution de l'usure, on constate une perte de masse régulière tant pour l'acier revêtu que pour celui non revêtu. Cependant, une observation attentive des 2000 premiers cycles pour l'acier revêtu est essentielle. En effet, elle révèle une perte de masse plus faible durant cette phase initiale, avant d'adopter une tendance linéaire à partir des 2000 cycles. Les volumes obtenus pour chaque condition ont été calculés à l'aide de la formule suivante :

$$Volume perdu(mm^3) = \frac{masse perdue (g)}{Densité du matériau (g/cm^3)} \times 1000 \quad (5-1)$$

Le Tableau 5-1 présente les résultats obtenus.

Tableau 5-1 Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier A8mod+0%W

	Masse perdue après 6000 cycles en g	Densité du matériau en g/cm^3	Volume perdu en mm^3
Acier A8 mod+ 0% W revêtu	1.386	7.7	180
Acier A8 mod+ 0% W non revêtu	1.686	7.7	219

Puisque le volume perdu par échantillon pour chaque type d'acier à outil ayant dépassé les 100mm³, nous avons opté pour la procédure B, qui est une variante à court terme de la procédure A. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 5-2 Résultats des tests d'usures pour l'acier A8 mod +0%W

	Nombre de spécimens	Masse perdue (g)	Masse perdue (mg)	Taux d'usure (mg/m)
Acier A8 mod+ 0% W revêtu	3	0.381 ± 0.03	380.67 ± 32.13	0.27
Acier A8 mod+ 0% W non revêtu	3	0.636 ± 0.007	636.33 ± 6.81	0.44

En analysant les résultats obtenus avec la procédure B, il est manifeste que l'application du revêtement a un impact significatif sur la résistance à l'usure de l'acier A8mod+0%W. Comme le montrent les données, le revêtement induit une réduction de l'usure de 39%, mettant en évidence les avantages du revêtement pour cet acier en particulier.

5.2.2 Acier A8 mod+1% W

De même, suivant la procédure A de la norme ASTM G65, nous avons obtenu les résultats des essais d'usure pour l'acier A8 modifié avec 1% de tungstène (W). La Figure 5-3-a illustre la trace d'usure observée tous les 1000 cycles de la roue. De son côté, la Figure 5-3-b montre l'évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles de la roue.

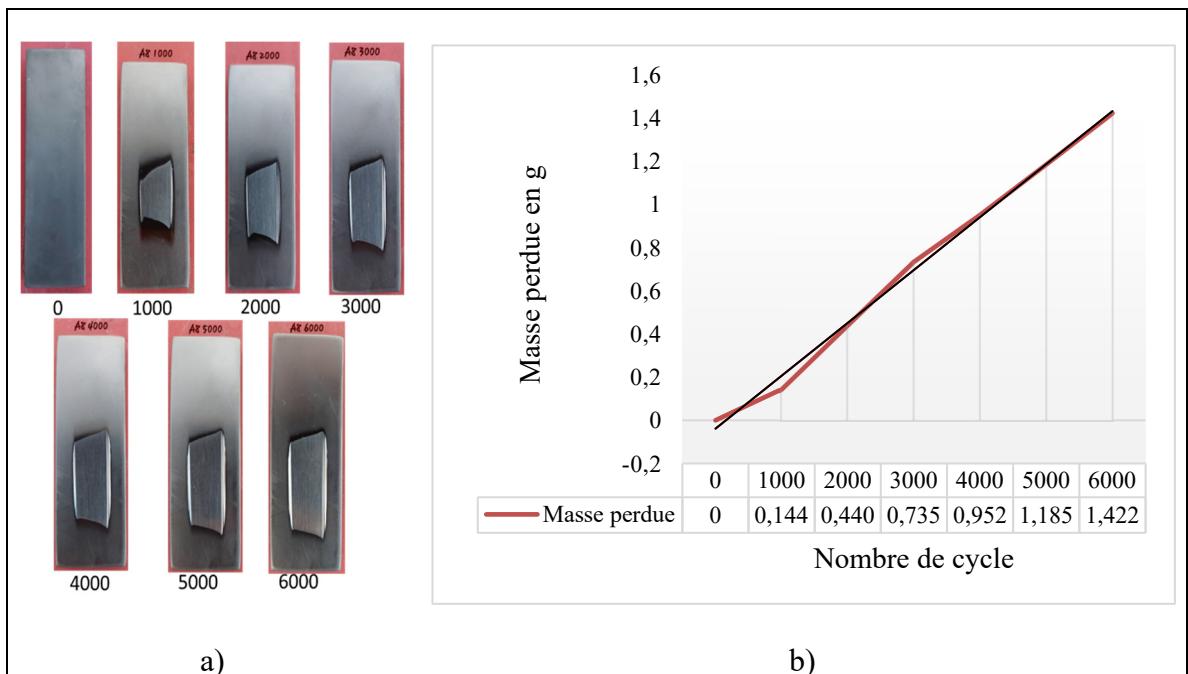


Figure 5-3 Acier A8 mod+1%W revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

Les résultats pour l'acier A8 mod+1%W non revêtu quant à eux sont présentés à la Figure 5-4

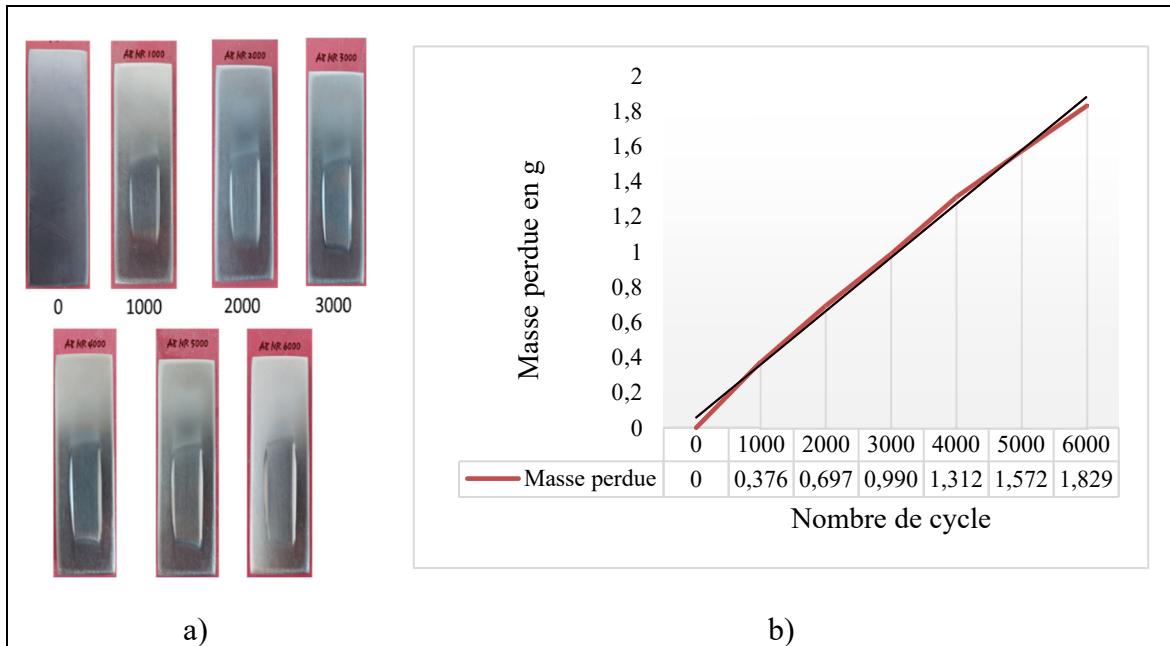


Figure 5-4 Acier A8 mod+1%W non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

En examinant l'évolution de l'usure, on constate la même observation que pour l'acier A8mod+0%W. On remarque une perte de masse régulière tant pour l'acier revêtu que pour celui non revêtu. Cependant, une observation attentive des 2000 premiers cycles pour l'acier revêtu révèle une perte de masse plus faible, mais qui tend à prendre la tendance linéaire observée à partir de 2000 cycles de la roue. Les volumes obtenus pour chaque condition sont les suivants :

Tableau 5-3 Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier A8mod+1%W

	Massee perdue après 6000 cycles en g	Densité du matériau en g/cm ³	Volume perdu en mm ³
Acier A8 mod+ 1% W revêtu	1.422	7.8	182
Acier A8 mod+ 1% W non revêtu	1.829	7.8	234

Puisque le volume perdu par échantillon pour chaque type d'acier à outil ayant dépassé les 100mm³, nous avons opté pour la procédure B, qui est une variante à court terme de la procédure A. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 5-4 Résultats des tests d'usures pour l'acier A8 mod +1%W

	Nombre de spécimens	Masse perdue (g)	Masse perdue (mg)	Taux d'usure (mg/m)
Acier A8 mod+ 1% W revêtu	3	0.339 ± 0.03	339.67 ± 26.63	0.24
Acier A8 mod+ 1% W non revêtu	3	0.675 ± 0.01	675 ± 11.53	0.47

De même, en analysant les résultats obtenus avec la procédure B, il est manifeste que l'application du revêtement a un impact significatif sur la résistance à l'usure de l'acier A8mod+ 1%W. Comme le montrent les données, le revêtement induit une réduction de l'usure de 49%, mettant en évidence les avantages du revêtement pour cet acier.

5.2.3 Acier W360

Par ailleurs, suivant la procédure A de la norme ASTM G65, nous avons obtenu les résultats des essais d'usure pour l'acier W360. La Figure 5-5-a illustre la trace d'usure observée tous les 1000 cycles de la roue. De son côté, la Figure 5-5-b montre l'évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles de la roue.

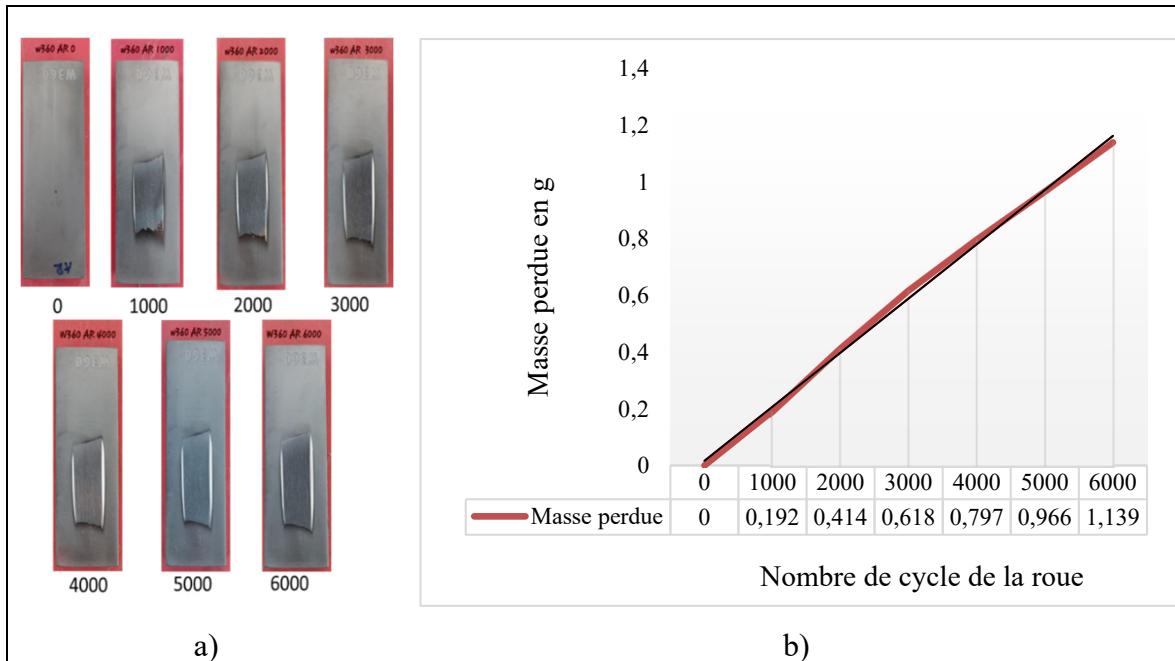


Figure 5-5 Acier W360 revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

Les résultats pour l'acier W360 non revêtu quant à eux sont présentés à la Figure 5-6.

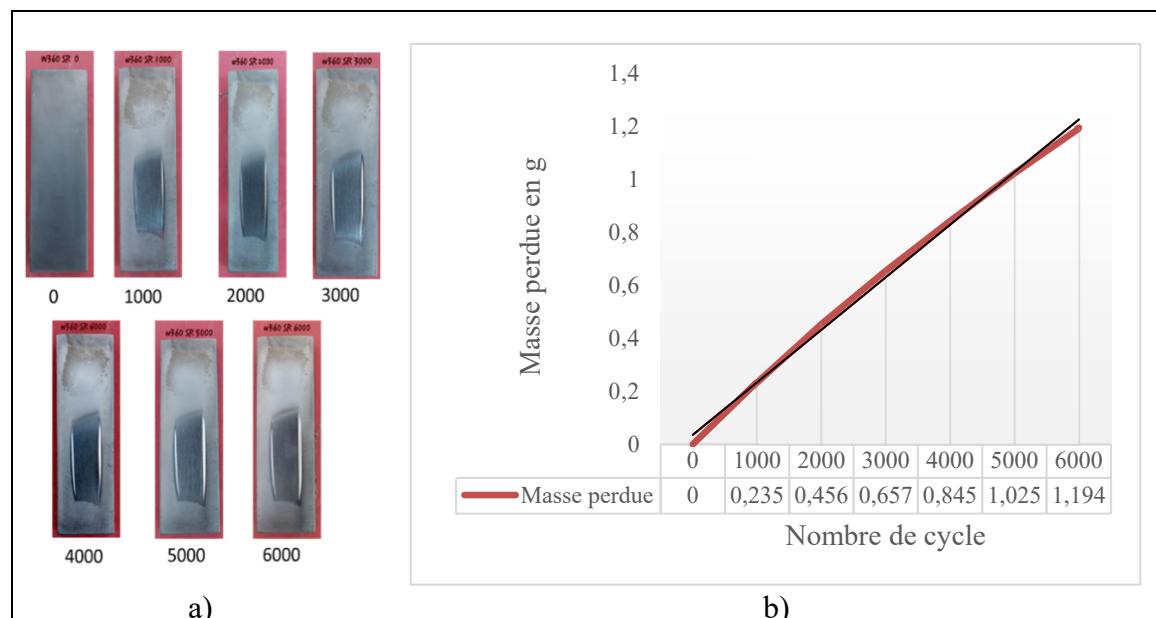


Figure 5-6 Acier W360 non revêtu a) Évolution de la trace d'usure et b) Évolution de la masse perdue, en fonction du nombre de cycles de la roue en caoutchouc

Lors de l'analyse de l'évolution de l'usure, une perte de masse constante est observée pour les deux types d'acier, qu'ils soient revêtus ou non. Toutefois, une particularité se distingue pour l'acier revêtu durant les 2000 premiers cycles, comparativement aux autres aciers. En effet, tant pour l'acier revêtu que pour celui non revêtu, la tendance de la perte de masse est linéaire et uniforme sur toute la période des 6000 cycles de la roue. Les volumes obtenus pour chaque condition sont les suivants :

Tableau 5-5 Volumes obtenus après 6000 cycles de la roue pour l'acier W360

	Masse perdue après 6000 cycles en g	Densité du matériau en g/cm ³	Volume perdu en mm ³
Acier W360 revêtu	1.139	7.6	150
Acier W360 non revêtu	1.194	7.6	157

Puisque le volume perdu par échantillon pour chaque type d'acier à outil ayant dépassé les 100mm³, nous avons opté pour la procédure B, qui est une variante à court terme de la procédure A. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 5-6 Résultats des tests d'usures pour l'acier W360

	Nombre de spécimens	Masse perdue (g)	Masse perdue (mg)	Taux d'usure (mg/m)
Acier W360 revêtu	3	0.381 ± 0.01	381 ± 12.5	0.27
Acier W360 non revêtu	3	0.436 ± 0.02	436 ± 16.37	0.30

En comparaison avec les autres aciers, l'analyse des résultats issus de la procédure B montre clairement que le revêtement n'apporte pas de bénéfice notable à la résistance à l'usure de l'acier W360. Les données indiquent une réduction de l'usure d'à peine 10% grâce au revêtement, soulignant ainsi son inefficacité pour cet acier en particulier.

5.3 Quantification de l'usure

5.3.1 Mesure de volume

Une autre technique a été employée pour évaluer le volume perdu de chaque échantillon. Cette approche repose sur l'usage d'un microscope à haute résolution, qui, après numérisation de l'échantillon, permet de déterminer le volume de la zone usée. Les données recueillies grâce à cette méthode sont compilées dans le tableau suivant :

Tableau 5-7 Volumes perdus obtenus par numérisation des échantillons



Acier	Nombre de spécimens par cas	Volume perdu Aciers revêtus (mm³)	Volume perdu Aciers non revêtus (mm³)
A8mod+1%W	3	40.67 ± 4.11	87.72 ± 4.97
A8mod+0%W	3	57.89 ± 8.23	90.67 ± 1.94
W360	3	46.65 ± 3.57	59.30 ± 8.77

La Figure 5-7 illustre mieux les résultats obtenus.

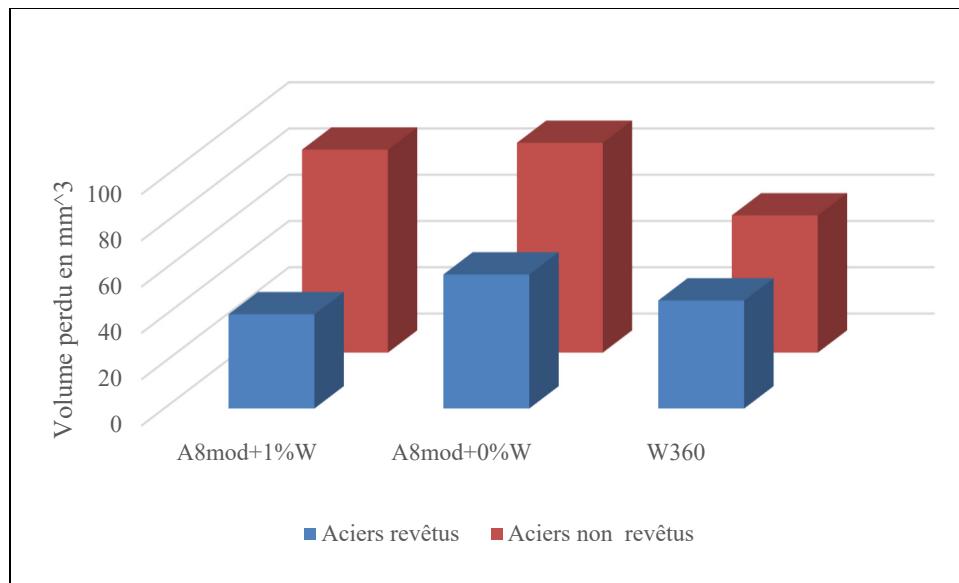


Figure 5-7 Volumes perdus en fonction du type d'acier

Les observations réalisées grâce à cette méthode concordent avec celles issues de la méthode de mesure de masse. La conclusion demeure donc la même : l'acier A8mod+1%W se distingue comme le choix privilégié pour une résistance optimale à l'usure après revêtement, tandis que l'acier W360 s'avère être le plus résistant à l'usure en l'absence de revêtement.

5.3.2 Mesure du profil

Par ailleurs, une mesure du profil de la trace d'usure a été effectuée dans le but d'examiner la profondeur et la morphologie de l'usure. La Figure 5-8 présente la mesure de profil pour un échantillon. Les résultats pour tous les échantillons en fonction du type d'acier sont présentés dans le Tableau 5-8.

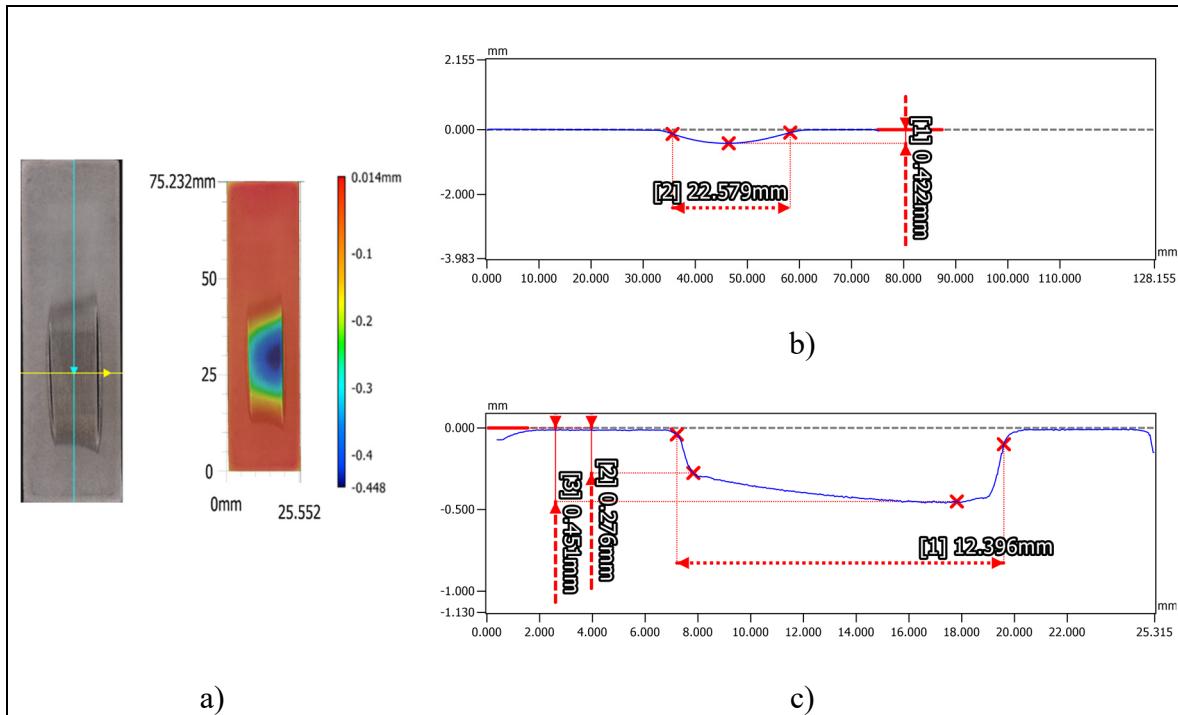


Figure 5-8 Mesure du profil d'usure a) Échantillon, b) Profil vertical, c) Profil horizontal

Tableau 5-8 Mesure de profil des éprouvettes du test d'usure

Type d'acier	Aciers revêtus					Aciers non revêtus					
	Type de Profil	Profil vertical (mm)		Profil horizontal (mm)			Profil vertical (mm)		Profil horizontal (mm)		
Numéro de Profil		[1]	[2]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[1]	[2]	[3]
A8mod+1%W		0.26	22.58	12.35	0.15	0.27	0.42	22.60	12.42	0.27	0.48
A8mod+0%W		0.30	22.58	12.38	0.18	0.34	0.42	22.58	12.41	0.27	0.46
W360		0.25	22.58	12.71	0.19	0.25	0.29	22.59	13.22	0.23	0.27

En nous basant sur la mesure [3] du profil horizontal, nous observons que la profondeur d'usure est en moyenne de 0.47mm pour les aciers A8mod+1%W et A8mod+0%W non revêtus. En

revanche, pour l'acier W360 non revêtu, cette profondeur est réduite à 0.27mm. Pour les aciers revêtus, les profondeurs moyennes d'usure sont de 0.27mm et 0.34mm respectivement pour les aciers A8mod+1%W et A8mod+0%W, tandis que l'acier W360 revêtu présente une profondeur d'usure de 0.25mm.

En conclusion, l'acier W360, qu'il soit revêtu ou non, montre une moindre profondeur d'usure comparativement aux aciers A8mod+1%W et A8mod+0%W. Cela souligne la supériorité intrinsèque de l'acier W360 en termes de résistance à l'usure. Cependant, le revêtement semble apporter une amélioration notable pour les aciers A8 modifiés, réduisant leur profondeur d'usure.

Toutefois, en prenant en compte l'ensemble des mesures, tant horizontales que verticales, la conclusion reste inchangée : l'acier A8mod+1%W se positionne comme le meilleur choix en termes de résistance à l'usure une fois revêtu, alors que l'acier W360 démontre la meilleure résistance à l'usure lorsqu'il est non revêtu.

5.4 Discussion des résultats

En examinant l'ensemble des résultats issus de la procédure B, plusieurs observations clés peuvent être faites concernant la résistance à l'usure des aciers testés, avec et sans revêtement:

- L'acier A8mod+0%W montre une amélioration notable de sa résistance à l'usure avec l'application du revêtement, affichant une réduction de l'usure de 39%.
- L'acier A8mod+1%W bénéficie également du revêtement, avec une réduction impressionnante de l'usure de 49%.
- En revanche, pour l'acier W360, le revêtement semble moins efficace, offrant une réduction de l'usure d'à peine 10%.

Tableau 5-9 Récapitulatifs des résultats d'usure

Condition	Aciers non revêtus			Aciers revêtus			
	Acier	A8mod +0%W	A8mod +1%W	W360	A8mod +0%W	A8mod +1%W	W360
Nombre de spécimens		3	3	3	3	3	3
Taux d'usure (mg/m)		0.44	0.47	0.3	0.27	0.24	0.27

En se référant au Tableau 5-9, on constate que l'acier W360 non revêtu présente le taux d'usure le plus faible parmi les aciers non revêtus, avec un taux de 0.3 mg/m. Cependant, parmi les aciers revêtus, c'est l'acier A8mod+1%W qui affiche le taux d'usure le plus bas à 0.24 mg/m, témoignant de sa haute résistance à l'usure une fois revêtue. La Figure 5-9 présente les résultats graphiques du taux d'usure en fonction du type d'acier

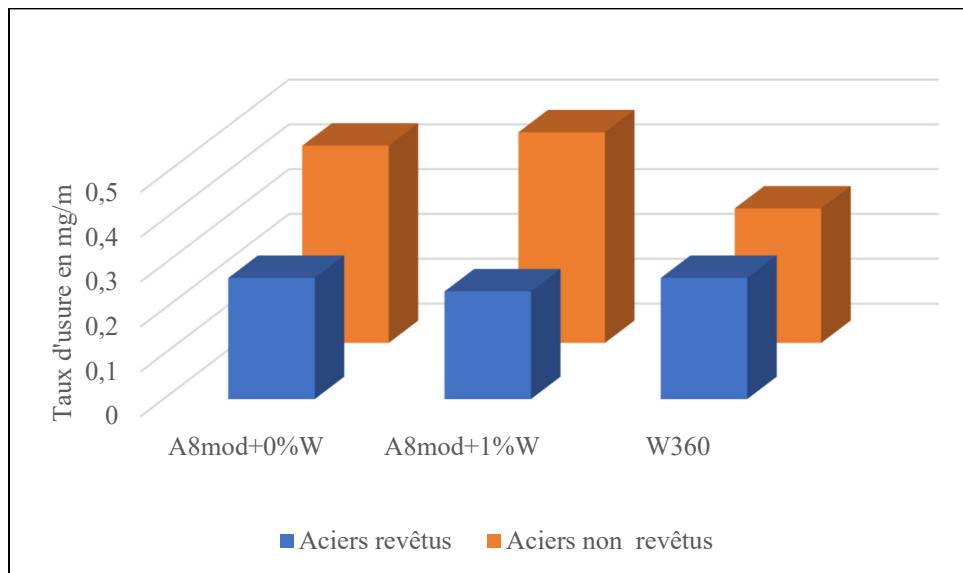


Figure 5-9 Taux d'usure en fonction du type d'acier

En conclusion, l'application d'un revêtement augmente significativement la résistance à l'usure des aciers A8mod+0%W et A8mod+1%W, avec ce dernier montrant les meilleures

performances une fois revêtues. Néanmoins, l'acier W360 présente une bonne résistance intrinsèque à l'usure sans revêtement, mais le revêtement n'apporte pas de bénéfice notable à cet acier. Si l'on recherche l'acier ayant la meilleure résistance à l'usure après revêtement, l'acier A8mod+1%W est le choix évident. Sans revêtement, l'acier W360 est le plus performant.

Il est pertinent de mentionner que les tests d'usure par abrasion se révèlent être des instruments informatifs cruciaux pour évaluer le potentiel des revêtements dans des conditions de coupe spécifiques (Knott, Lugscheider, Löffler, Krämer, & Zimmermann, 1994). Ces évaluations mettent en exergue la contribution significative des revêtements dans l'amélioration de la résistance à l'usure abrasive des aciers à outils (Grenier, 1998). Les données issues de ces tests d'usure, peuvent fournir une compréhension approfondie de la performance des revêtements, révélant ainsi leur efficacité dans la prolongation de la longévité des outils en acier face aux défis posés par l'usure abrasive.

5.5 Conclusion

Cette étude scientifique a examiné les propriétés mécaniques d'usure abrasive de trois types d'acier à outil : A8 mod+1%W, A8 mod+0%W et W360, en mettant un accent particulier sur l'efficacité des revêtements pour améliorer leur résistance à l'usure abrasive. Les tests, conduits selon la norme ASTM G65, ont révélé que l'acier A8 mod+1%W revêtu a la meilleure résistance à l'usure parmi les aciers revêtus, avec une réduction significative de l'usure de 49%. D'un autre côté, l'acier W360 non revêtu a montré une excellente résistance intrinsèque à l'usure, mais le revêtement n'a pas offert d'amélioration notable pour ce type d'acier.

En termes d'applications pratiques, les résultats suggèrent que l'acier A8 mod+1%W est le choix optimal lorsque les aciers revêtus sont requis, tandis que l'acier W360 est préférable lorsque le revêtement n'est pas nécessaire. Ces découvertes sont essentielles pour l'industrie de la transformation primaire du bois, aidant à l'optimisation de la sélection des matériaux et des traitements de surface pour maximiser la durabilité et l'efficacité des outils.

En somme, cette étude fournit des informations cruciales pour le choix des aciers dans l'industrie de la transformation primaire du bois, en mettant en lumière les performances relatives de différents aciers à outil en termes de résistance à l'usure abrasive, et en identifiant les bénéfices potentiels de l'application de revêtements sur ces aciers.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette recherche était de caractériser l'usure des couteaux jetables utilisés par les équarrisseurs lors de la première transformation du bois. Dans ce contexte, une analyse approfondie des mécanismes d'usure des aciers à outils a été réalisée, en se concentrant sur leurs propriétés, leur composition chimique, leur microstructure et leur dureté. Les variations observées dans ces paramètres ont permis de mieux comprendre comment chaque type d'acier répond aux conditions d'usure. Cela a souligné l'importance de la sélection judicieuse de l'acier et de son revêtement pour des applications spécifiques, comme celles rencontrées dans l'industrie du bois.

Parmi les aciers analysés, l'acier W360 s'est distingué par sa remarquable résistance à l'usure et aux impacts. Il a été démontré que la teneur en chrome n'est pas le seul facteur déterminant de la résistance à l'abrasion. En effet, la présence d'éléments tels que le molybdène, le vanadium et certaines caractéristiques microstructurales joue également un rôle crucial. Si les revêtements ont été efficaces pour diminuer l'usure, leur interaction avec des aciers spécifiques, tels que l'acier A8 mod+1%W, requiert des études supplémentaires pour garantir une compatibilité et une efficacité optimales.

La méthodologie développée, basée sur la numérisation des outils avant et après usure, s'est avérée pertinente. La mesure de la différence de volume a fourni une quantification précise de l'usure. Nos observations montrent une progression de l'usure avec le temps, avec des disparités notables entre les couteaux revêtus et non revêtus. Les couteaux non revêtus ont tendance à s'user plus rapidement, cette usure étant probablement exacerbée par des facteurs tels que les variations dans les conditions d'usinage et la présence d'impuretés dans le bois.

En comparant les performances des trois aciers à outils étudiés, il est apparu que l'acier A8 avec 1% de tungstène, malgré certaines indications de fragilité, présente une meilleure résistance à l'usure lorsqu'il est revêtu. Cependant, l'acier W360, qu'il soit revêtu ou non, surpassé les variantes d'acier A8 en termes de résistance à l'usure.

En complément, une analyse selon la norme ASTM G65 a été menée pour évaluer la résistance à l'usure abrasive des aciers. Les résultats montrent que l'acier A8 mod+1%W revêtu offre la meilleure résistance parmi les aciers revêtus, avec une réduction de l'usure de 49%. En revanche, bien que l'acier W360 ait montré une excellente résistance intrinsèque, le revêtement n'a pas apporté d'amélioration significative pour cet acier.

En synthèse, pour des applications nécessitant des aciers revêtus, l'acier A8 mod+1%W semble être le choix le plus judicieux. En l'absence de nécessité de revêtement, l'acier W360 est recommandé. Ces conclusions sont d'une importance capitale pour l'industrie de la première transformation du bois, guidant vers une optimisation de la sélection des matériaux et des traitements de surface pour maximiser la longévité et l'efficacité des outils.

Les résultats de ce mémoire ont servi à la rédaction de deux articles intitulés " **A New Approach for Quantifying Wear of Cutting Tools for Wood Machining** " et " **Wear Resistance Evaluation of Three Tool Steels in Primary Wood Processing: A Comparison between Experimental Observations and Literary Predictions** ", présentés respectivement en ANNEXE VII (p.131) et ANNEXE VIII (p.161).

RECOMMANDATIONS

Les résultats de cette étude peuvent orienter la sélection des aciers et des revêtements dans l'industrie du bois pour optimiser la durabilité et la performance des outils.

Ils suggèrent également que la résistance à l'usure dépend de plusieurs facteurs, dont la composition chimique, la microstructure, et l'interaction avec le revêtement.

Perspectives futures :

- Des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les mécanismes sous-jacents qui contribuent à la résistance à l'usure exceptionnelle de l'acier W360 et pour explorer la possibilité de développer de nouveaux alliages avec des propriétés similaires.
- Des recherches futures devraient également se concentrer sur l'analyse détaillée de l'interaction entre les revêtements et les différents types d'acier pour éviter les incompatibilités et améliorer l'efficacité des revêtements.
- Enfin, l'optimisation des compositions chimiques et des microstructures pour atteindre un équilibre entre dureté, résistance à l'usure, et résistance aux chocs pourrait être un domaine de recherche fructueux.

Les variations observées dans le taux d'usure soulignent également l'importance des conditions d'usinage et de la qualité du bois utilisé. Des études futures pourraient donc se concentrer sur :

- L'analyse de l'impact de différentes impuretés dans le bois sur l'usure des outils et l'évaluation de nouvelles stratégies pour minimiser l'usure dans des conditions d'usinage défavorables.
- Des recherches supplémentaires pourraient explorer d'autres types de revêtements et de traitements de surface pour améliorer davantage la résistance à l'usure de ces aciers, en particulier pour l'acier W360.

- Une analyse approfondie de la morphologie de l'usure et de l'interaction entre les revêtements et les substrats métalliques pourrait fournir des connaissances précieuses pour le développement de nouveaux matériaux et traitements de surface.

ANNEXE I

RESULTATS DE LA NUMERISATION DES COUTEAUX A8 MOD +1%W EN FONCTION DU TEMPS

Tableau-A I-1 Résultats de la numérisation des couteaux A8 mod +1%W en fonction du temps

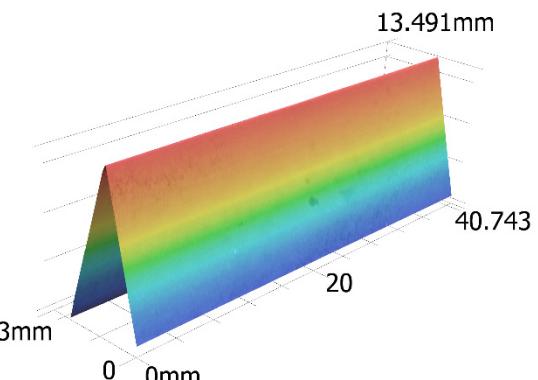
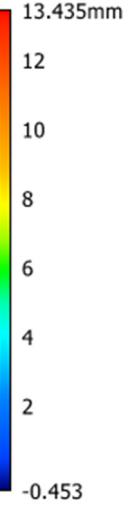
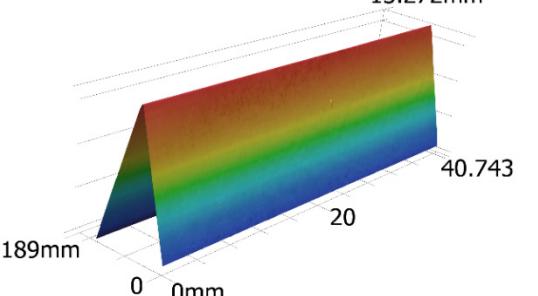
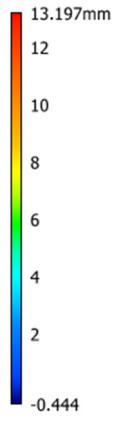
Temps de travail	Identification	3D image	Height color
28h	V1.1		
52h	V1.2		

Tableau-A I-1 Résultats de la numérisation des couteaux A8 mod +1%W en fonction du temps (suite)

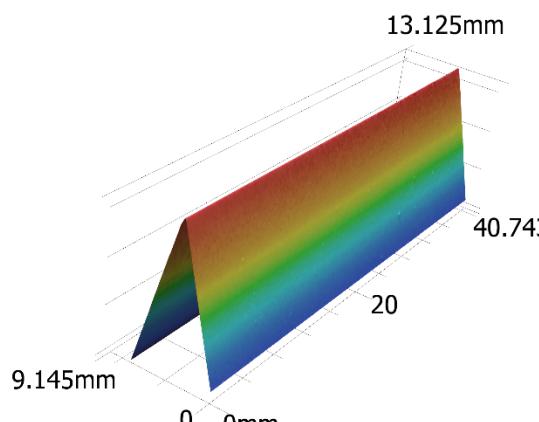
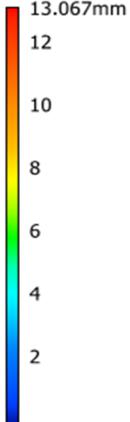
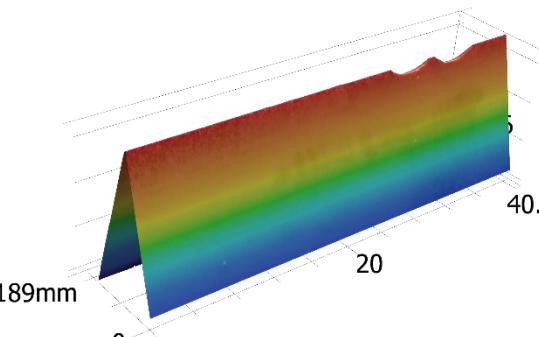
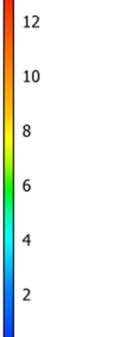
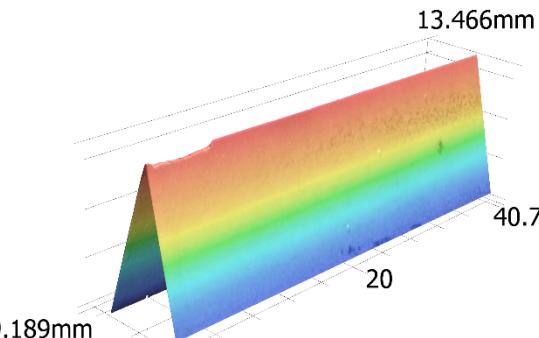
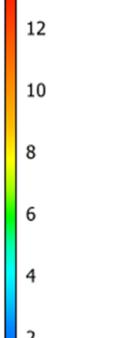
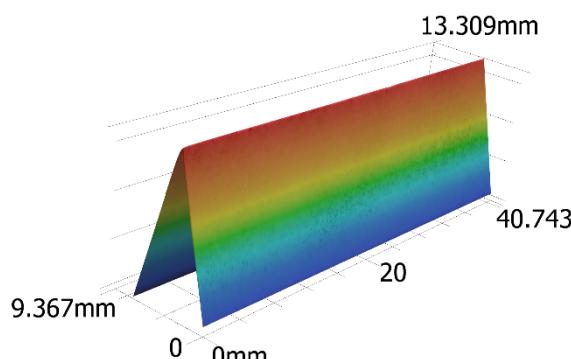
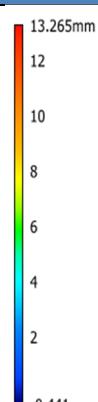
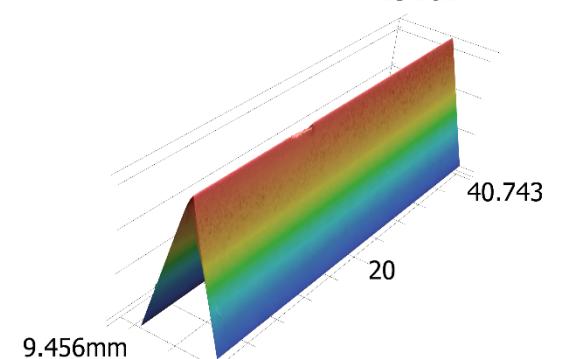
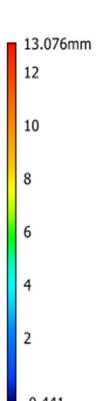
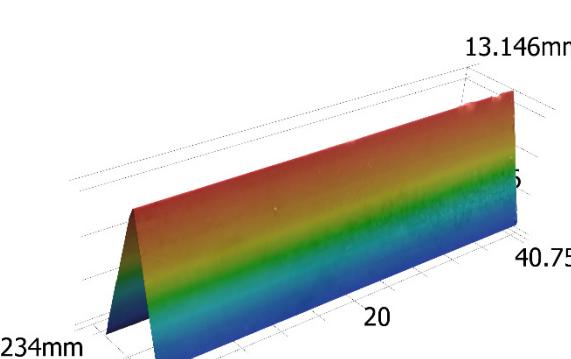
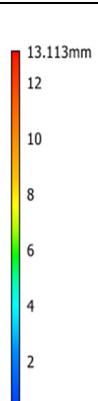
Temps de travail	Identification	3D image	Height color
76h	V1.3		
100h	V1.4		
28h	V2.1		

Tableau-A I-1 Résultats de la numérisation des couteaux A8 mod +1%W en fonction du temps (suite)

Temps de travail	Identification	3D image	Height color
52h	V2.2	 <p>13.309mm 40.743 9.367mm 0mm 0mm</p>	 <p>13.265mm 12 10 8 6 4 2 -0.441</p>
76h	V2.3	 <p>13.162mm 40.743 9.456mm 0mm 0mm</p>	 <p>13.076mm 12 10 8 6 4 2 -0.441</p>
100h	V2.4	 <p>13.146mm 40.758 9.234mm 0mm 0mm</p>	 <p>13.113mm 12 10 8 6 4 2 -0.432</p>

ANNEXE II

RESULTATS DE LA NUMERISATION DES COUTEAUX EN FONCTION DU TYPE D'ACIER

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier

Identification	3D image	Height color
Aciers W360 non revêtus		
W.3.1		
W.3.2		
W.3.3		

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier(suite)

Identification	3D image	Height color
Aciers W360 revêtus		
W.1.1		
W.1.2		
W.1.3		

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier (suite)

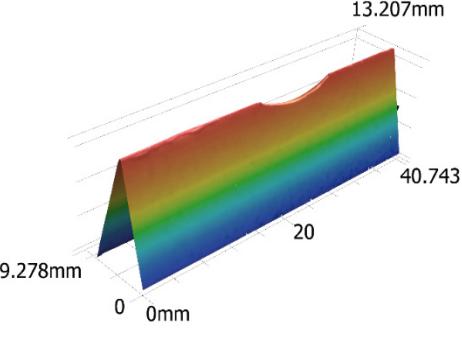
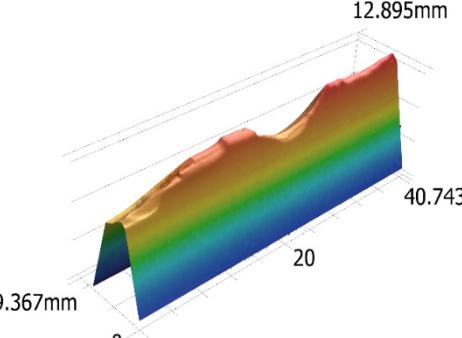
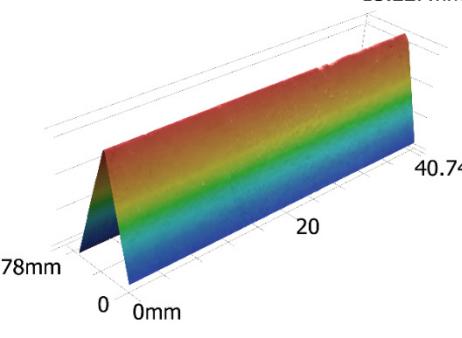
Identification	3D image	Height color
Aciers A8 mod+1%W revêtus		
X.1.1		
X.1.2		
X.1.3		

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier (suite)

Identification	3D image	Height color
Aciers A8 mod+1%W non revêtus		
X.3.1		
X.3.2		
X.3.3		

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier (suite)

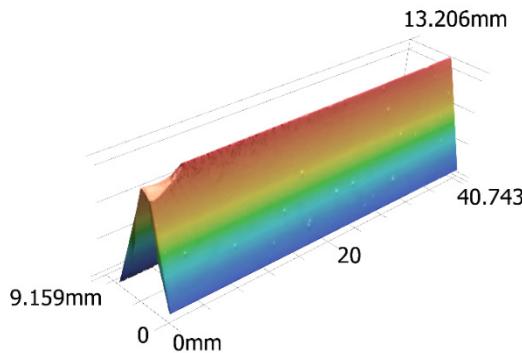
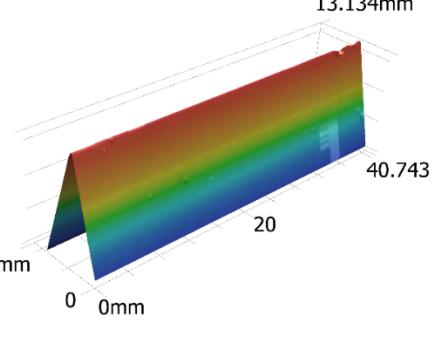
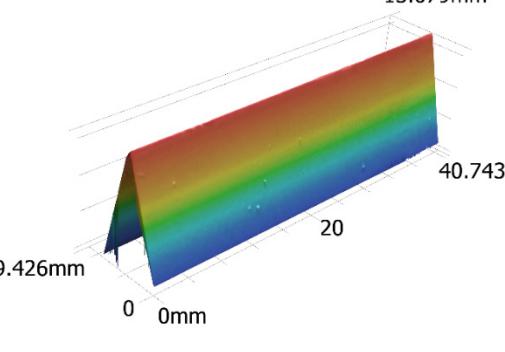
Identification	3D image	Height color
Aciers A8 mod+0%W revêtus		
Y.1.1	 <p>13.206mm 9.159mm 0 0mm 40.743</p>	 <p>13.147mm 12 10 8 6 4 2 -0.449</p>
Y.1.2.	 <p>13.134mm 9.278mm 0 0mm 40.743</p>	 <p>13.089mm 12 10 8 6 4 2 -0.464</p>
Y.1.3	 <p>13.079mm 9.426mm 0 0mm 40.743</p>	 <p>13.045mm 12 10 8 6 4 2 -0.449</p>

Tableau-A II-1 Résultats de la numérisation des couteaux en fonction du type d'acier (suite)

Identification	3D image	Height color
Aciers A8 mod+0%W non revêtus		
Y.3.1	<p>13.06mm 40.743 9.278mm 0 0mm</p>	
Y.3.2	<p>13.236mm 40.743 9.486mm 0 0mm</p>	
Y.3.3	<p>12.96mm 40.743 9.323mm 0 0mm</p>	

ANNEXE III

RESULTATS DES VOLUMES PERDUS EN FONCTION DU TYPE D'ACIER

Tableau-A III-1 Résultats des volumes perdus en fonction du type d'acier

Identifiant	Volume avant usure mm^3	Volume après usure mm^3	Volume de matière perdu mm^3	Volume perdu par usure mm^3
Aciers W360 revêtus				
W.1.1	2653.67	2641.15	12.52	2.99
W.1.2	2654.60	2642.10	12.50	0.94
W.1.3	2620.21	2598.80	21.41	1.10
Aciers W360 non revêtus				
W.3.1	2611.38	2584.08	27.30	1.07
W.3.2	2614.62	2605.56	9.06	3.79
W.3.3	2627.27	2607.65	19.63	4.18
Aciers A8 mod+1%W revêtus				
X.1.1	2570.32	2546.09	24.23	0.54
X.1.2	2582.08	2495.19	86.89	Non considéré
X.1.3	2569.65	2547.15	22.50	3.98
Aciers A8 mod+1%W non revêtus				
X.3.1	2595.52	2565.38	30.14	3.49
X.3.2	2595.52	2587.53	7.99	3.98
X.3.3	2591.10	2565.38	25.72	3.01

Tableau-A III-1 Résultats des volumes perdus en fonction du type d'acier (suite)

Identifiant	Volume avant usure mm^3	Volume après usure mm^3	Volume de matière perdu mm^3	Volume perdu par usure mm^3
Aciers A8 mod+0%W revêtus				
Y.1.1	2570.25	2558.59	11.66	1.32
Y.1.2.	2589.81	2573.14	16.67	2.46
Y.1.3	2563.12	2546.21	16.91	2.92
Aciers A8 mod+0%W non revêtus				
Y.3.1	2554.04	2538.55	15.49	3.98
Y.3.2	2622.67	2607.56	15.11	2.00
Y.3.3	2593.56	2519.17	74.39	Non considéré

ANNEXE IV

RESULTATS DES TESTS D'USURE

Tableau-A IV-1 Résultats obtenus par mesure des masses

Identifiant	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Masse perdu (g)
A8 mod +0 % W non revêtu 1	139.965	139.321	0.644
A8 mod +0 % W non revêtu 2	138.631	138	0.631
A8 mod +0 % W non revêtu 3	142.14	141.506	0.634
A8 mod +0 % W revêtu 1	137.56	137.176	0.384
A8 mod +0 % W revêtu 2	141.717	141.306	0.411
A8 mod +0 % W revêtu 3	141.234	140.887	0.347
A8 mod +1 % W non revêtu 1	145.621	144.933	0.688
A8 mod +1 % W non revêtu 2	144.336	143.67	0.666
A8 mod +1 % W non revêtu 3	144.175	143.504	0.671
A8 mod +1 % W revêtu 1	145.295	144.978	0.317
A8 mod +1 % W revêtu 2	145.195	144.862	0.333
A8 mod +1 % W revêtu 3	144.509	144.14	0.369
W360 non revêtu 1	144.832	144.392	0.44
W360 non revêtu 2	144.523	144.105	0.418
W360 non revêtu 3	144.91	144.46	0.45
W360 revêtu 1	144.808	144.418	0.39
W360 revêtu 2	144.907	144.54	0.367
W360 revêtu 3	144.785	144.398	0.387

Tableau-A IV-2 Résultats obtenus par mesure du volume perdu après chaque test

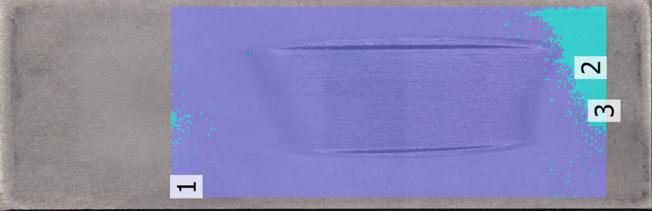
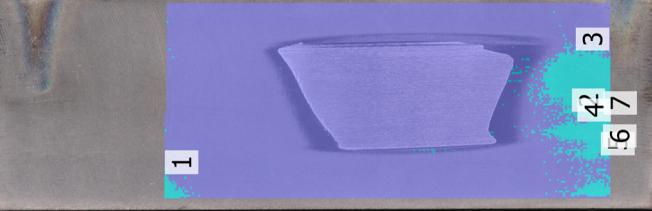
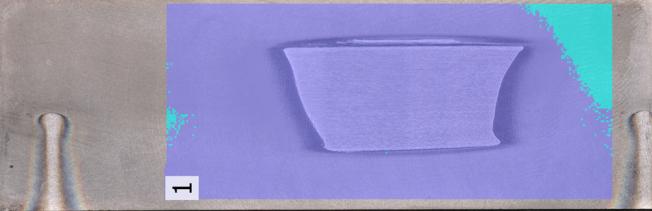
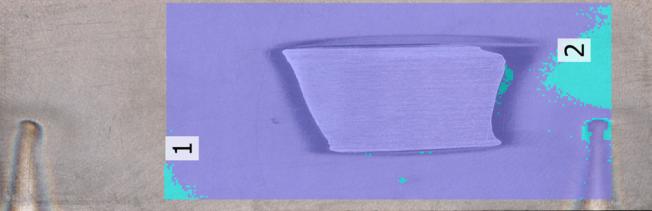
Identifiant	Zone mesurée	Volume mm ³
A8 mod +0 % W non revêtu 1		91.757
A8 mod +0 % W non revêtu 2		88.430
A8 mod +0 % W non revêtu 3		91.836
A8 mod +0 % W revêtu 1		53.589
A8 mod +0 % W revêtu 2		67.389
A8 mod +0 % W revêtu 3		52.701

Tableau-A IV-2 Résultats obtenus par mesure du volume perdu après chaque test (suite)

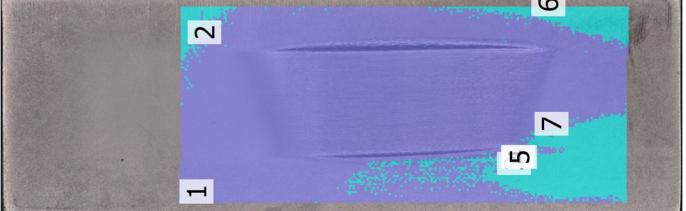
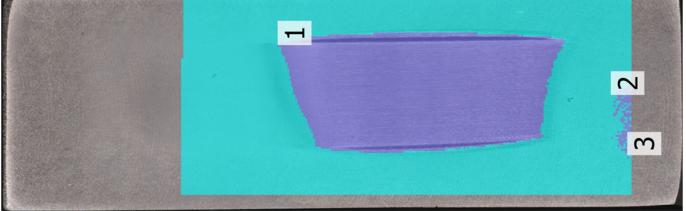
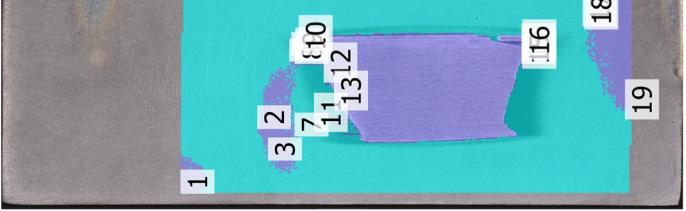
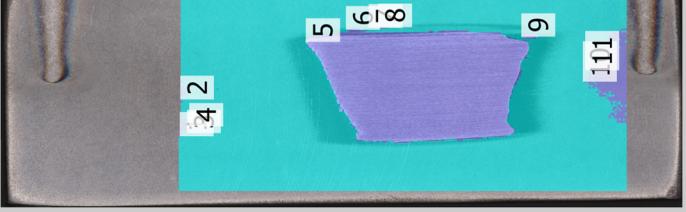
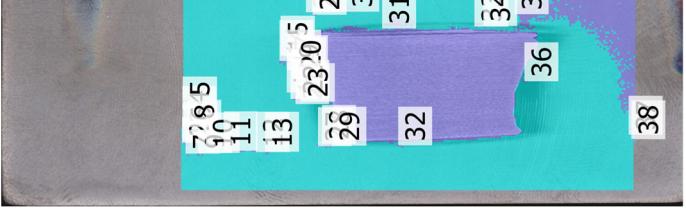
Identifiant	Zone mesurée	Volume mm ³
A8 mod +1 % W non revêtu 1		93.002
A8 mod +1 % W non revêtu 2		83.130
A8 mod +1 % W non revêtu 3		87.028
A8 mod +1 % W revêtu 1		37.346
A8 mod +1 % W revêtu 2		39.400
A8 mod +1 % W revêtu 3		45.274

Tableau-A IV-2 Résultats obtenus par mesure du volume perdu après chaque test (suite)

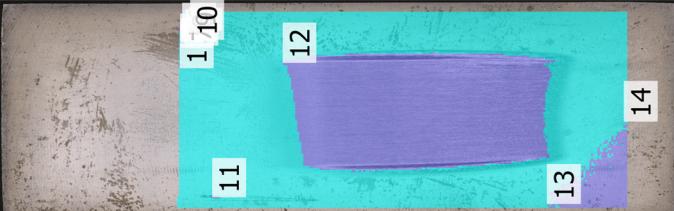
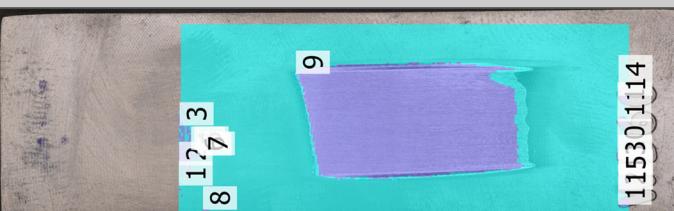
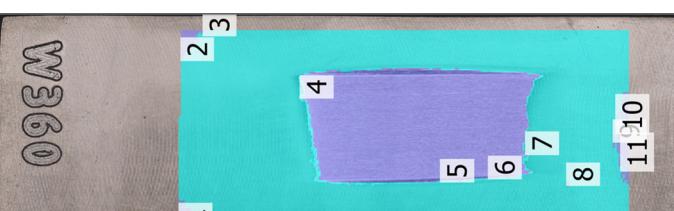
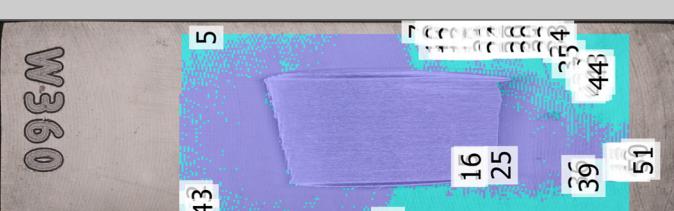
Identifiant	Zone mesurée	Volume mm ³
W360 non revêtu 1		53.454
W360 non revêtu 2		69.388
W360 non revêtu 3		55.060
W360 revêtu 1		44.226
W360 revêtu 2		44.983
W360 revêtu 3		50.756

Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil

Measurement data name	Profile 3D	Profile Heightcolor	Profile Vertical Heightgraph	Profile Horizontal Heightgraph
AN mod +0.2% W non revet 1	75.96mm 0.050mm 50 25 0mm 25.255 0.020mm	0.165mm 0.328mm 0.299mm 22.553mm 0.020mm	0.165mm 0.328mm 0.287mm 0.381mm 0.299mm 22.552mm 0.020mm	0.165mm 0.328mm 0.287mm 0.381mm 0.299mm 22.552mm 0.020mm
AN mod +0.2% W non revet 2	75.49mm 0.028mm 50 25 0mm 25.155 0.014mm	0.14mm 0.289mm 0.319mm 22.553mm 0.014mm	0.14mm 0.289mm 0.319mm 22.553mm 0.014mm	0.14mm 0.289mm 0.319mm 22.553mm 0.014mm
AN mod +0.2% W non revet 3	75.55mm 0.030mm 50 25 0mm 25.048 0.019mm	0.19mm 0.35mm 0.294mm 22.57mm 0.019mm	0.19mm 0.35mm 0.294mm 22.57mm 0.019mm	0.19mm 0.35mm 0.294mm 22.57mm 0.019mm

Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil (suite)

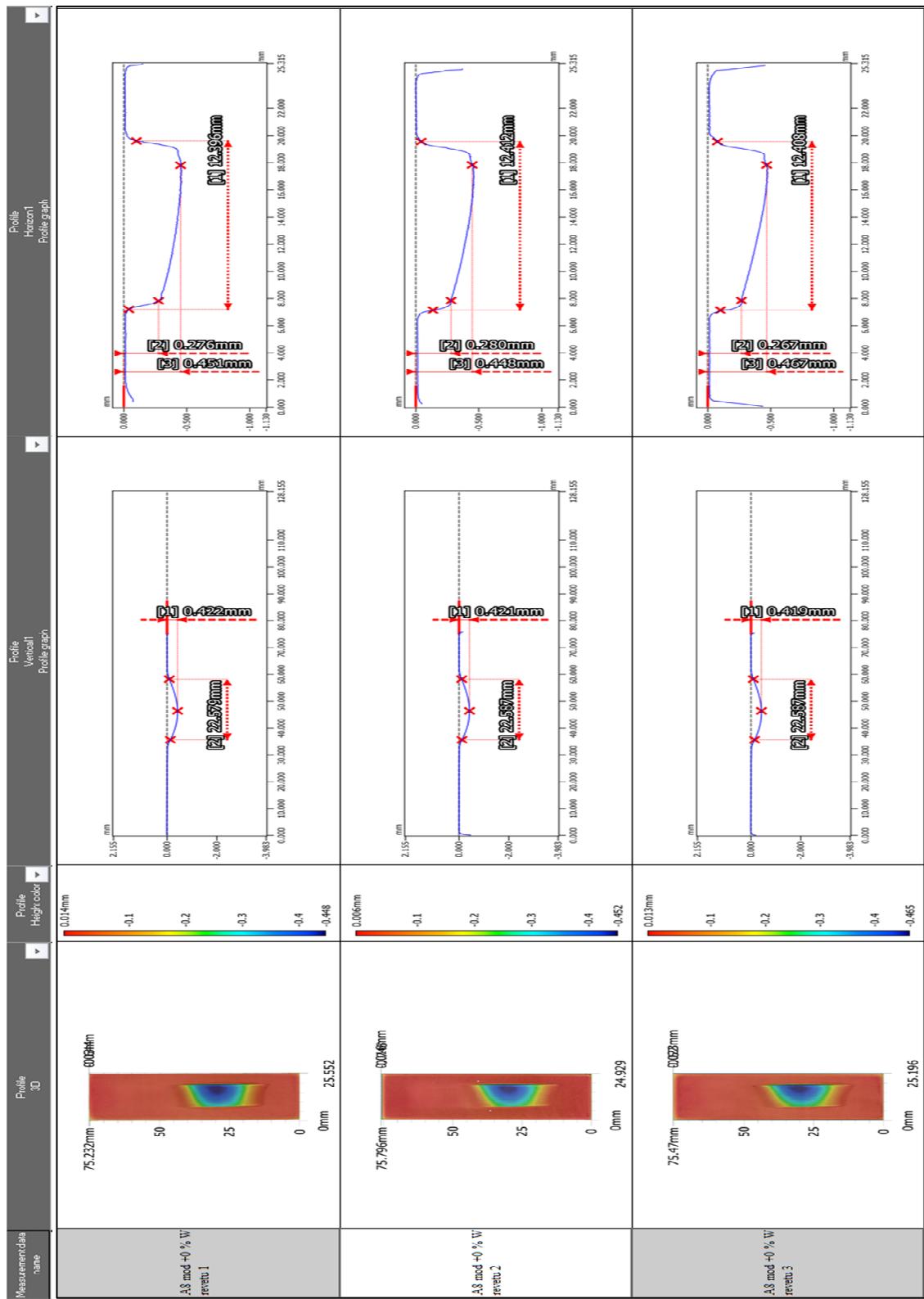


Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil (suite)

Measurement data name	Profile 3C	Profile Height color	Profile Vertical Profile graph	Profile Horizontal Profile graph
AS mod +1 % W non revetu 1	76.359mm 0.0162mm 50 25 0mm 25.641	0.014mm -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 -0.493	0.016mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.268mm [3] 0.468mm [4] 2240mm	0.016mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.262mm [3] 0.479mm [4] 2247mm
AS mod +1 % W non revetu 2	75.973mm 0.0123mm 50 25 0mm 24.84	0.011mm -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 -0.466	0.013mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.414mm [3] 0.299mm [4] 22.91mm	0.013mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.274mm [3] 0.482mm [4] 2249mm
AS mod +1 % W non revetu 3	76.003mm 0.0128mm 50 25 0mm 26.026	0.006mm -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 -0.471	0.006mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.415mm [3] 0.299mm [4] 22.91mm	0.006mm 2.155 0.000 -2.000 -3.883 mm [2] 0.274mm [3] 0.482mm [4] 2249mm

Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil (suite)

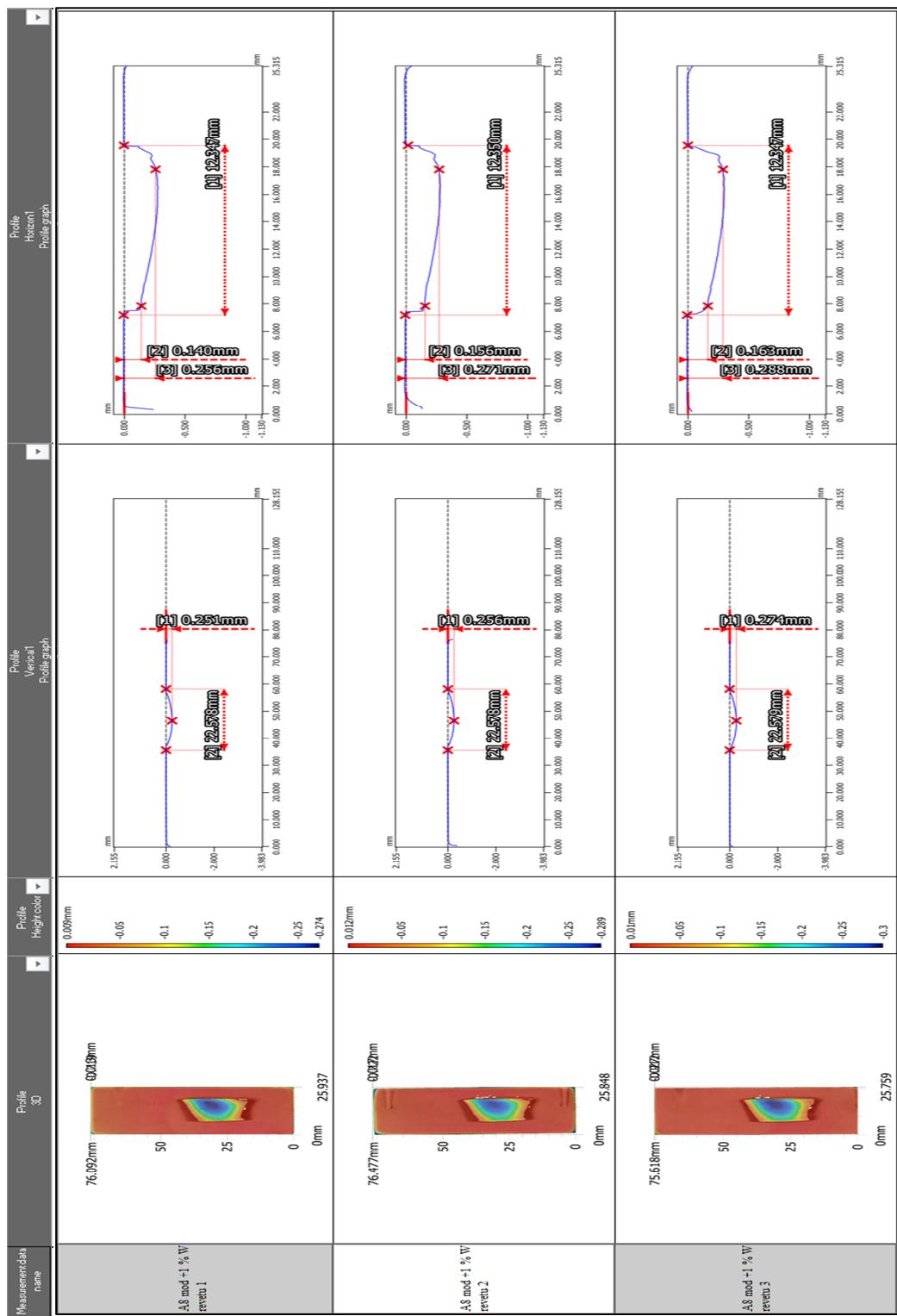


Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil (suite)

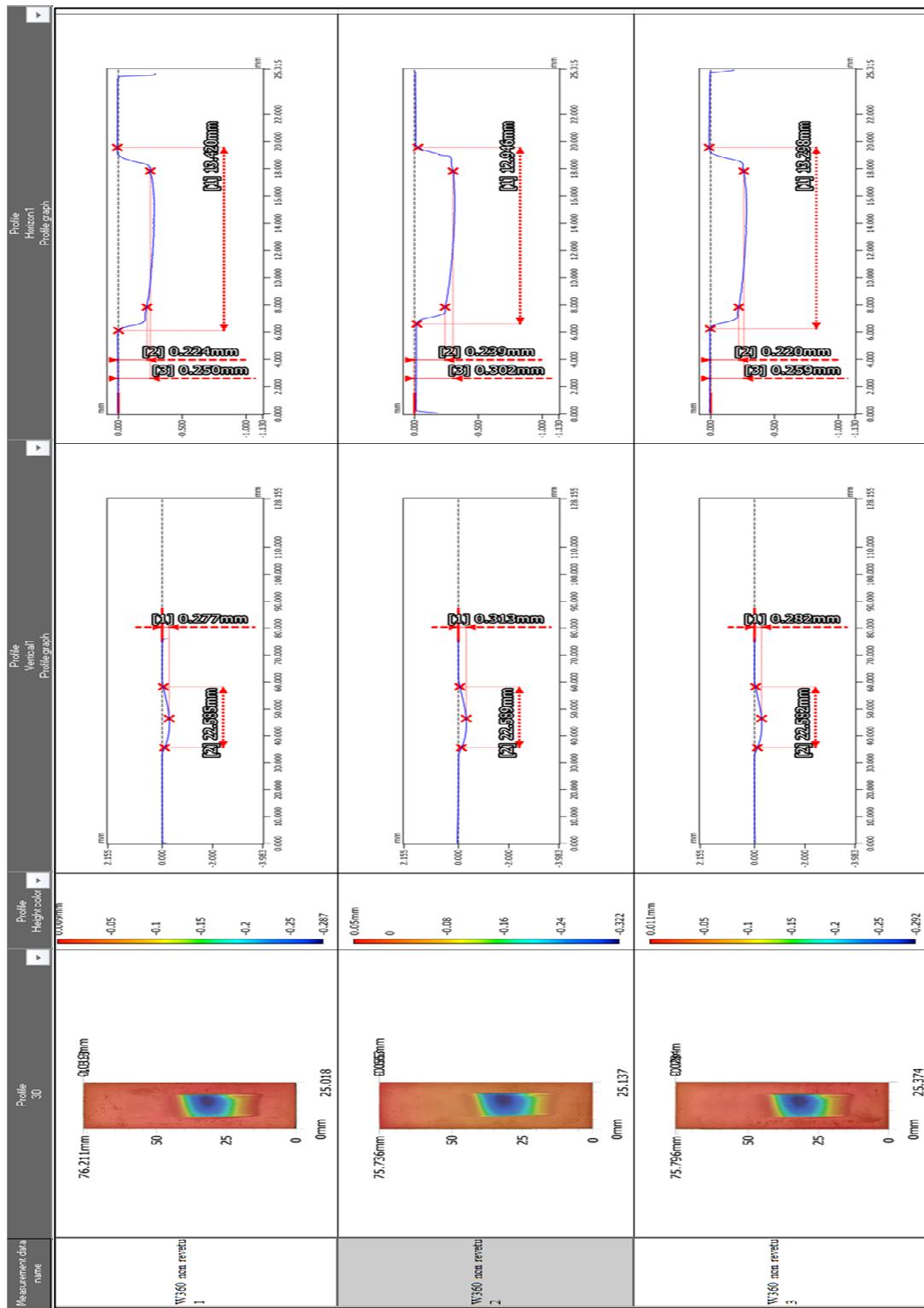


Tableau-A IV-3 Résultats de la mesure de profil (suite)

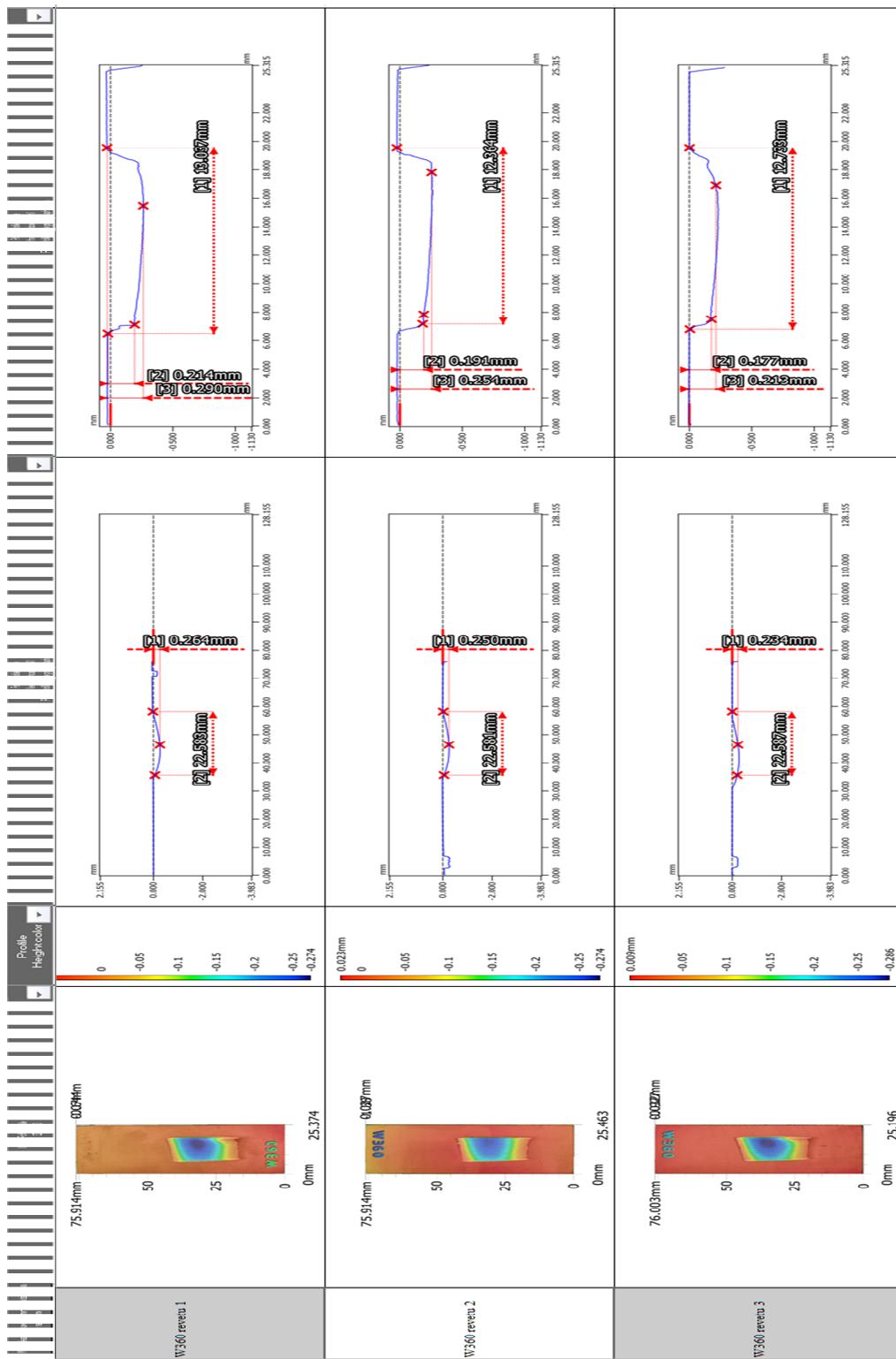


Tableau-A IV-4 Résultats de la mesure de profil

Identifiant	Profil vertical (mm)		Profil horizontal (mm)		
	[1]	[2]	[1]	[2]	[3]
A8 mod+0%W non revêtu 1	0.299	22.58	12.348	0.165	0.328
A8 mod+0%W non revêtu 2	0.319	22.582	12.374	0.207	0.381
A8 mod+0%W non revêtu 3	0.294	22.579	12.426	0.181	0.298
A8 mod +0 %W revêtu 1	0.422	22.579	12.396	0.276	0.451
A8 mod +0 %W revêtu 2	0.421	22.587	12.412	0.28	0.448
A8 mod +0 %W revêtu 3	0.419	22.587	12.408	0.267	0.467
A8 mod+1%W non revêtu 1	0.433	22.607	12.4	0.263	0.468
A8 mod+1%W non revêtu 2	0.414	22.59	12.437	0.262	0.479
A8 mod+1%W non revêtu 3	0.415	22.592	12.409	0.274	0.482
A8 mod +1 % W revêtu 1	0.251	22.578	12.347	0.14	0.256
A8 mod+1% W revêtu 2	0.256	22.578	12.35	0.156	0.271
A8 mod+1% W revêtu 3	0.274	22.579	12.347	0.163	0.288
W360 non revêtu 1	0.277	22.585	13.42	0.224	0.25
W360 non revêtu 2	0.313	22.589	12.946	0.239	0.302
W360 non revêtu 3	0.282	22.582	13.298	0.22	0.259
W360 revêtu 1	0.264	22.583	13.037	0.214	0.29
W360 revêtu 2	0.25	22.581	12.364	0.191	0.254
W360 revêtu 3	0.234	22.587	12.733	0.177	0.213

ANNEXE V

ANALYSE STATISTIQUE : ANALYSE DE LA VARIANCE

Tableau-A V-1 Informations sur les facteurs

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
Alliage	Fixe	3	A0, A1, W
Condition	Fixe	2	N, R

Tableau-A V-2 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Alliage	2	206.21	52.87%	206.21	103.105	15.17	0.005
Condition	1	65.61	16.82%	65.61	65.614	9.65	0.021
Alliage*Condition	2	77.46	19.86%	77.46	38.729	5.70	0.041
Erreur	6	40.78	10.45%	40.78	6.797		-
Total	11	390.06	100.00%				-

Tableau-A V-3 Récapitulatif du modèle

S	R carré	R carré (ajust)	SomCar- ErrPrév	R carré (prév)	AICc	BIC
2.60705	89.55%	80.83%	163.121	58.18%	90.73	66.13

Tableau-A V-4 Coefficients

Terme	Coeff	Coef ErT	IC à 95 %	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	19.893	0.753	(18.052, 21.735)	26.43	0.000	
Alliage						
A0	-3.85	1.06	(-6.45, - 1.24)	-3.62	0.011	1.33
A1	5.75	1.06	(3.15, 8.36)	5.41	0.002	1.33
Condition						
N	2.338	0.753	(0.497, 4.180)	3.11	0.021	1.00
Alliage*Condition						
A0 N	-3.08	1.06	(-5.69, - 0.48)	-2.90	0.027	1.33
A1 N	-0.06	1.06	(-2.66, 2.55)	-0.05	0.960	1.33

Equation de régression

$$\begin{aligned}
 VER = & 19.893 - 3.85 \text{ Alliage_A0} + 5.75 \text{ Alliage_A1} - 1.91 \text{ Alliage_W} \\
 & + 2.338 \text{ Condition_N} - 2.338 \text{ Condition_R} - 3.08 \text{ Alliage} \\
 & * \text{Condition_A0 N} + 3.08 \text{ Alliage} * \text{Condition_A0R} \quad (\text{A V-1}) \\
 & - 0.06 \text{ Alliage} * \text{Condition_A1 N} + 0.06 \text{ Alliage} \\
 & * \text{Condition_A1 R} + 3.14 \text{ Alliage} * \text{Condition_WN}
 \end{aligned}$$

Tableau-A V-5 Ajustements et diagnostics pour les observations aberrantes

Observation	3	12
VER	19.63	27.3
Valeur ajustée	23.46	23.46
ErT ajust	1.84	1.84
IC à 95 %	(18.95, 27.98)	(18.95, 27.98)
Résiduelle	-3.84	3.84
Val. résid. norm.	-2.08	2.08
Val. résid. suppr.	-3.6	3.6
HI	0.5	0.5
Distance de Cook	0.72	0.72
DFITS	-3.5972 R	3.5972 R

Avec R : Valeur résiduelle élevée

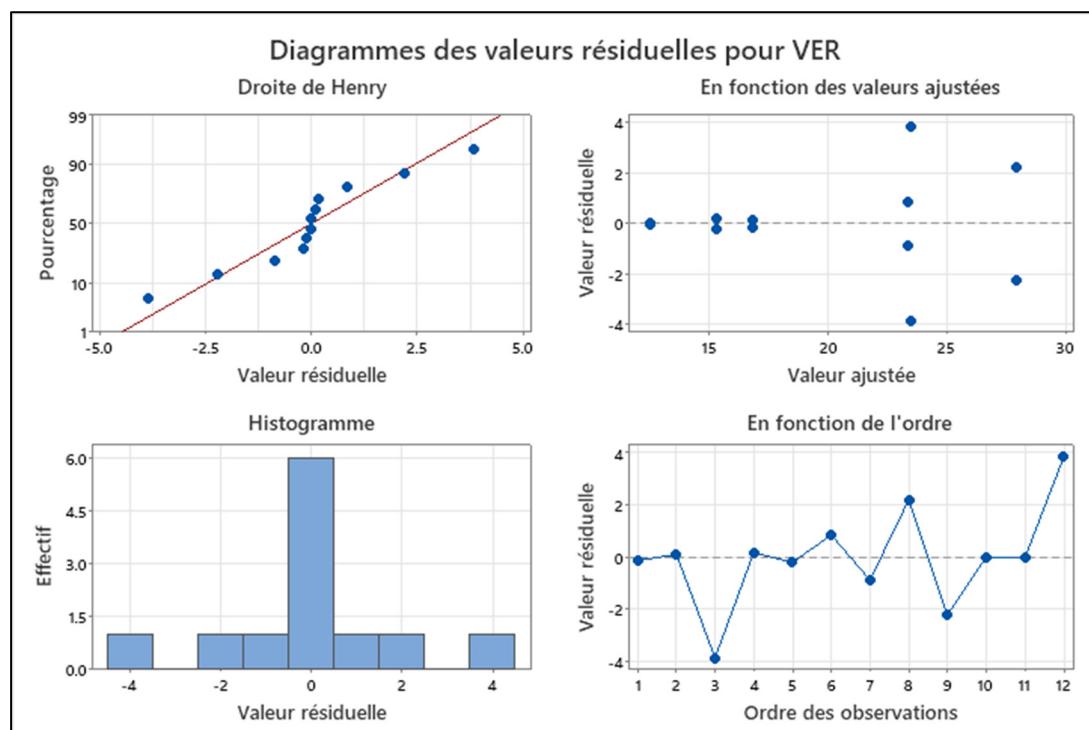


Figure-A V-1 Diagramme des valeurs résiduelles

ANNEXE VI

TABLE STATISTIQUE DE FISHER

Tableau-A VI-1 Table statistique de Fisher

Tiré de Bourbonnais (2003)

v_2	$v_1 = 1$		$v_1 = 2$		$v_1 = 3$		$v_1 = 4$		$v_1 = 5$	
	$P = 0,05$	$P = 0,01$	$P = 0,05$	$P = 0,01$	$P = 0,05$	$P = 0,01$	$P = 0,05$	$P = 0,01$	$P = 0,05$	$P = 0,01$
1	161,4	4052	199,5	4999	215,7	5403	224,6	5625	230,2	5764
2	18,51	98,49	19,00	99,00	19,16	99,17	19,25	99,25	19,30	99,30
3	10,13	34,12	9,55	30,81	9,28	29,46	9,12	28,71	9,01	28,24
4	7,71	21,20	6,94	18,00	6,59	16,69	6,39	15,98	6,26	15,52
5	6,61	16,26	5,79	13,27	5,41	12,06	5,19	11,39	5,05	10,97
6	5,99	13,74	5,14	10,91	4,76	9,78	4,53	9,15	4,39	8,75
7	5,59	12,25	4,74	9,55	4,35	8,45	4,12	7,85	3,97	7,45
8	5,32	11,26	4,46	8,65	4,07	7,59	3,84	7,01	3,69	6,63
9	5,12	10,56	4,26	8,02	3,86	6,99	3,63	6,42	3,48	6,06
10	4,96	10,04	4,10	7,56	3,71	6,55	3,48	5,99	3,33	5,64
11	4,84	9,65	3,98	7,20	3,59	6,22	3,36	5,67	3,20	5,32
12	4,75	9,33	3,88	6,93	3,49	5,95	3,26	5,41	3,11	5,06
13	4,67	9,07	3,80	6,70	3,41	5,74	3,18	5,20	3,02	4,86
14	4,60	8,86	3,74	6,51	3,34	5,56	3,11	5,03	2,96	4,69
15	4,54	8,68	3,68	6,36	3,29	5,42	3,06	4,89	2,90	4,56
16	4,49	8,53	3,63	6,23	3,24	5,29	3,01	4,77	2,85	4,44
17	4,45	8,40	3,59	6,11	3,20	5,18	2,96	4,67	2,81	4,34
18	4,41	8,28	3,55	6,01	3,16	5,09	2,93	4,58	2,77	4,25
19	4,38	8,18	3,52	5,93	3,13	5,01	2,90	4,50	2,74	4,17
20	4,35	8,10	3,49	5,85	3,10	4,94	2,87	4,43	2,71	4,10
21	4,32	8,02	3,47	5,78	3,07	4,87	2,84	4,37	2,68	4,04
22	4,30	7,94	3,44	5,72	3,05	4,82	2,82	4,31	2,66	3,99
23	4,28	7,88	3,42	5,66	3,03	4,76	2,80	4,26	2,64	3,94
24	4,26	7,82	3,40	5,61	3,01	4,72	2,78	4,22	2,62	3,90
25	4,24	7,77	3,38	5,57	2,99	4,68	2,76	4,18	2,60	3,86
26	4,22	7,72	3,37	5,53	2,98	4,64	2,74	4,14	2,59	3,82
27	4,21	7,68	3,35	5,49	2,96	4,60	2,73	4,11	2,57	3,78
28	4,20	7,64	3,34	5,45	2,95	4,57	2,71	4,07	2,56	3,75
29	4,18	7,60	3,33	5,42	2,93	4,54	2,70	4,04	2,54	3,73
30	4,17	7,56	3,32	5,39	2,92	4,51	2,69	4,02	2,53	3,70
40	4,08	7,31	3,23	5,18	2,84	4,31	2,61	3,83	2,45	3,51
60	4,00	7,08	3,15	4,98	2,76	4,13	2,52	3,65	2,37	3,34
120	3,92	6,85	3,07	4,79	2,68	3,95	2,45	3,48	2,29	3,17
∞	3,84	6,64	2,99	4,60	2,60	3,78	2,37	3,32	2,21	3,02

ANNEXE VII

A NEW APPROACH FOR QUANTIFYING WEAR OF CUTTING TOOLS FOR WOOD MACHINING

Vanella Mbakop Nanshie^a, Ali Aidibe^b, Majid Heidari^c, Mohammad Jahazi^d

^{a,b,d} Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS),
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^c DK-Spec, 1060 Chem. Olivier, Lévis, Québec, Canada G7A 2M8

Article finalisé à soumettre sous peu

Abstract

In this article, we introduce a new approach to quantify the wear of cutting tools used in the wood industry, with a particular emphasis on tool steels. Wear is defined here as the progressive loss of material during wood squaring operations. We suggest an innovative method that relies on the use of a high-resolution microscope to scan the tool both before and after wear. These scanned images are subsequently analyzed to precisely measure the wear experienced by the cutting tools.

To ensure the accuracy of this analysis, we employ a contactless 3D measurement system, accompanied by a specially adapted sample holder. Additionally, we use a scanning powder to minimize unwanted reflections. For data processing, we use software specialized in 3D dimensional analysis and digital data processing. The method also involves comparing the initial and final volume of the cutting edge of the tool steels, obtained through the scanning procedure.

Keywords: Wear quantification, Cutting edge, Wood squaring, High-resolution microscope, Digitization procedure

Introduction

In Canada's thriving wood industry, construction lumber stands out as the primary wood product. The transformation of round wood into refined products is predominantly achieved using cutting tools crafted from specialized steels. These tools, characterized by their unique geometries and specific thermal treatments, play a pivotal role in ensuring an efficient and high-quality transformation of wood. However, the journey of these meticulously designed tools is not devoid of challenges. One of the most pressing issues they face is premature wear, a phenomenon that can escalate production costs, lead to production losses, and compromise the quality of the final product. This wear is a manifestation of a multifaceted interplay of friction, deformation, chemical reactions, and the inherent variability of wood ((Kowaluk et al., 2009);(S. C. Ghosh et al., 2015);(Barrow, 1972)).

These wear mechanisms can be classified into several categories: Abrasive wear, one of the most common mechanisms, occurs when hard particles or asperities of one surface slide or roll over another, reminiscent of the action of sandpaper ((Kovaříková et al., 2009);(Pooley & Tabor, 1972);(Murray et al., 1982);(Mang, Bobzin, & Bartels, 2011);(Cayer-Barrioz, 2003);(Petrica, Badisch, & Peinsitt, 2013);(Feng, Smith, Borghesani, Randall, & Peng, 2021)). Adhesive wear is dominated by high adhesive forces and physico-chemical interactions, leading to plastic deformations and material transfer between surfaces ((Aghababaei et al., 2016);(DJAFRI, 2015);(Brink & Molinari, 2019);(Affatato & Brando, 2013)). Fatigue wear manifests when materials are subjected to repetitive stresses, causing cracks that can lead to catastrophic failures ((Ionescu, 2012);(Stachowiak & Batchelor, 2014)). Lastly, corrosive wear combines mechanical and chemical effects, where chemical reactions on the material surface are accelerated by mechanical wear, resulting in material loss ((He et al., 2014);(Dearnley & Aldrich-Smith, 2004);(Komotori et al., 2007);(Mair et al., 1996)).

The manifestations of tool wear during the cutting process are predominantly observed in two forms: wear on the cutting face and clearance wear. The former arises from the erosion of the tool material at the surface directly interacting with the workpiece, often attributed to friction, cutting forces, and the elevated temperatures during machining (Barrow, 1972). The latter,

clearance wear, is observed along the tool's lateral face and can be induced by shearing and frictional forces during the cutting process, potentially leading to tool weakening and reduced cutting efficiency ((Astakhov, 2004);(Dolinšek et al., 2001)).

Given the critical implications of tool wear, its accurate assessment becomes paramount. A spectrum of techniques, ranging from rudimentary visual inspections to advanced methodologies like Scanning Electron Microscopy (SEM) and profilometry, have been developed to gauge tool wear (Jakub et al., 2011). While the simplicity of visual inspections offers rapid evaluations, it might lack the precision that advanced methods, albeit time-consuming, can provide (Sheikh-Ahmad et al., 2003).

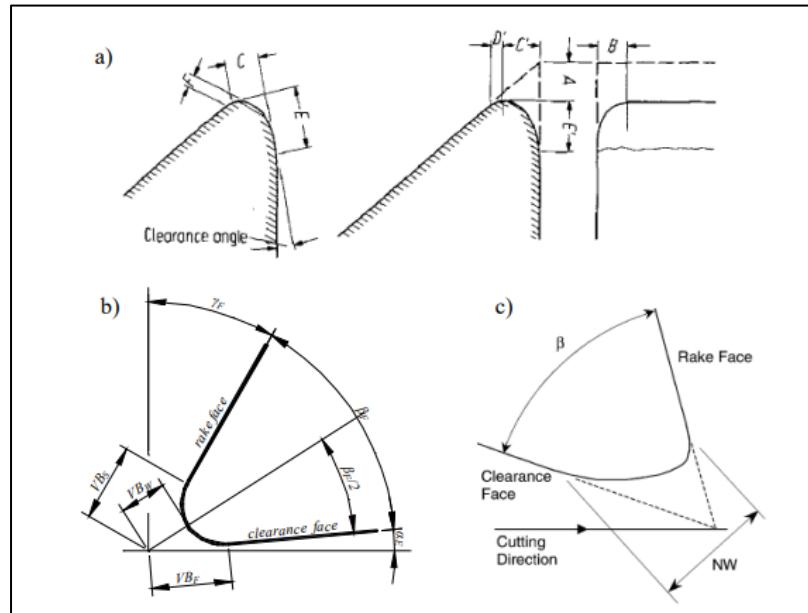
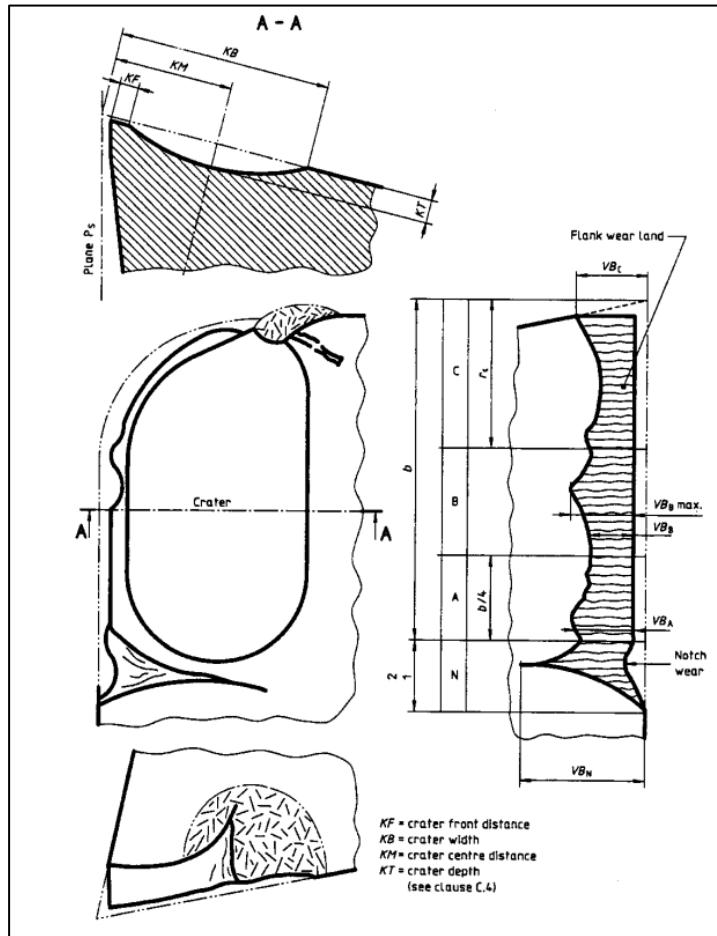


Figure-A VII-1 Geometrical parameters of the cutting-edge
Wear as considered by McKenzie and Karovich (1975) (a),
Porankiewicz et al. (2003) (b) and Sheikh et al. (2003) (c)
Tiré de Jakub et al (2011)

With the advent of modern technology, innovative methods have been proposed to quantify wear. Jurkovic et al (Jurkovic et al., 2005) introduced a system based on industrial vision, while Dawson et Kurfess (Dawson & Kurfess, 2005) utilized surface fitting techniques to analyze microscope images. These methods, although promising, may require specific

expertise and complex implementation. Furthermore, Lee and al. have developed a simplified method based on the direct analysis of the three-dimensional scanning data of the worn specimen, without requiring a separate reference scan (Lee et al., 2022).

Confronted with these challenges, the quest for a wear quantification method that seamlessly blends accuracy with practicality for the wood industry becomes indispensable. Such a method holds the promise of not only extending tool lifespan but also refining the final product quality, optimizing cutting parameters, and curtailing machining costs. In this light, this article aims to introduce an innovative method to quantify the wear of wood-cutting tools and presents an application of this method specifically for the modified A8 tool steel.



The central issue addressed in this article is as follows: How can one assess and quantify the wear of tool steels in a non-destructive manner while ensuring speed, efficiency, reliability, and precision? In response to this challenge, the primary objective of this research is to devise a new methodology based on high-resolution imaging analysis. This approach aims to provide an optimal solution for measuring wear without compromising the tool's integrity, while meeting the precision and speed requirements essential in the industrial context.

The traditional wear quantification method, based on a 2D approach, has several limitations. While it requires point-by-point measurement and provides a direct assessment of the tool's geometry, it's bogged down by a tedious manual process. It does not account for the entire length of the worn edge due to the non-uniform nature of wear. Moreover, it's destructive as it requires a sample cut and is also time-consuming, averaging five minutes per point without considering sample preparation time. In contrast, the proposed 3D methodology offers a semi-automatic solution that captures the entirety of the edge. It allows for the measurement of lost volume and the wear profile. Its non-destructive nature and speed, averaging twenty minutes per sample, make it far superior to the traditional 2D method. This study aims to use a three-dimensional (3D) approach for wear quantification, in contrast to the two-dimensional (2D) approach commonly used in the industrial sector.

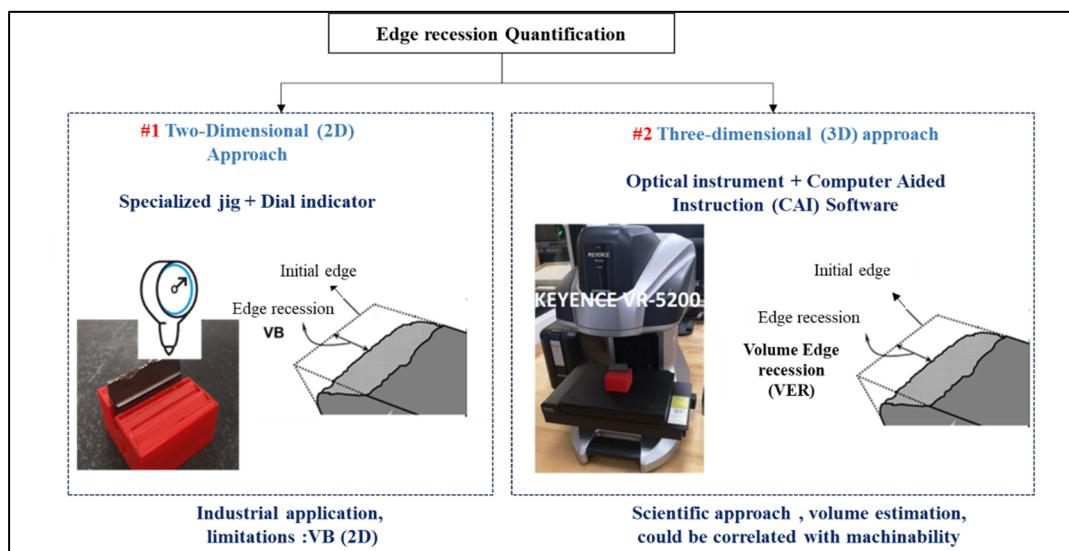


Figure-A VII-3 Approach for wear quantification

The paper is structured as follows. Section 2 outlines the methodology established for wear quantification. Section 3 describes the numerical and experimental approaches used to gather data. Section 4 presents and analyzes the results. Section 5 discusses the implications of our findings and makes recommendations for the wear quantification procedure within the wood industry.

Materials and Methods

Description of the methodology

The proposed approach involves employing a high-resolution microscope to conduct pre- and post-wear scans of knives, boasting a display resolution of 0.1 μm . The repeatability of these scans is documented as 0.5 μm at high resolution and 1 μm at low resolution (*Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual*, s.d.). For this study, brand-new knives are meticulously positioned on a specially designed holder, then scanned following a stringent procedure. Similarly, worn-out knives are subjected to the identical scanning protocol. The obtained scan data, both from the new and worn knives, can be analyzed utilizing the microscope's integrated software or exported to other computational platforms such as Polyworks, Matlab, Python, CloudCompare, among others. This methodology furnishes actionable data to assess and quantify knife wear, providing a streamlined and rigorous approach in the examination of wood-cutting tool degradation. The procedure can be schematically represented as shown:

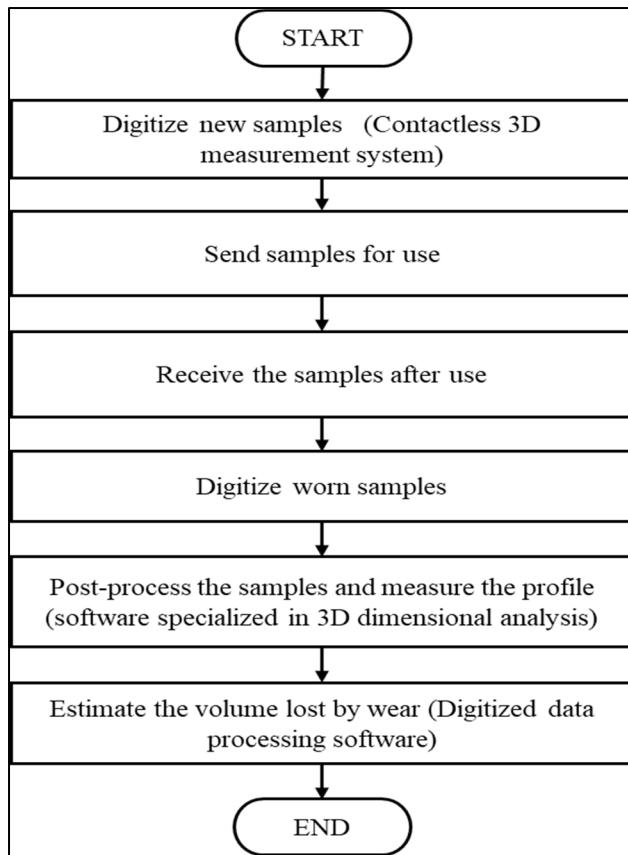


Figure-A VII-4 Diagram of the wear quantification methodology

The Keyence microscope stands out as an exemplary imaging apparatus, adept at wear characterization. At the zenith of wood-cutting tool wear assessment, it boasts high-resolution imagery complemented by advanced automation and analytic capabilities. Employing digital microscopy, the device can capture detailed images with unparalleled clarity. Its premium lens ensures an impressive depth of field, allowing for vivid 3D visualization of specimens. Among its features, the microscope offers automated scanning and measurement functionalities, including auto-alignment, auto-focus, and precise positioning. This not only ensures ease of operation but also guarantees the accuracy of measurements. Additionally, the microscope comes with intuitive software designed for detailed visualization and metric analysis (*Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual, s.d.*).

An integral component of the microscopic process is the sample holder, which was custom 3D-printed by Dk-Spec to cater to the unique needs of the experiment. This holder has been meticulously designed to securely position the specimens, enabling effortless manipulation and detailed microscopic observation. The choice and design of this holder play a crucial role in ensuring measurement reliability and result reproducibility, both of which are foundational in the assessment of wood-cutting tool wear.

Another vital step in the preparation process involves treating knives with a scanning powder. This procedure, aimed at minimizing reflections during microscopic observations, involves sprinkling a powder comprising fine particles onto the knife surfaces. This powder diffuses the incident light, mitigating unwanted glare and reflections which might otherwise affect the image quality. Consequently, details, especially on the cutting edge of the knives, become clearer and more pronounced, an essential factor in accurate wear evaluation.

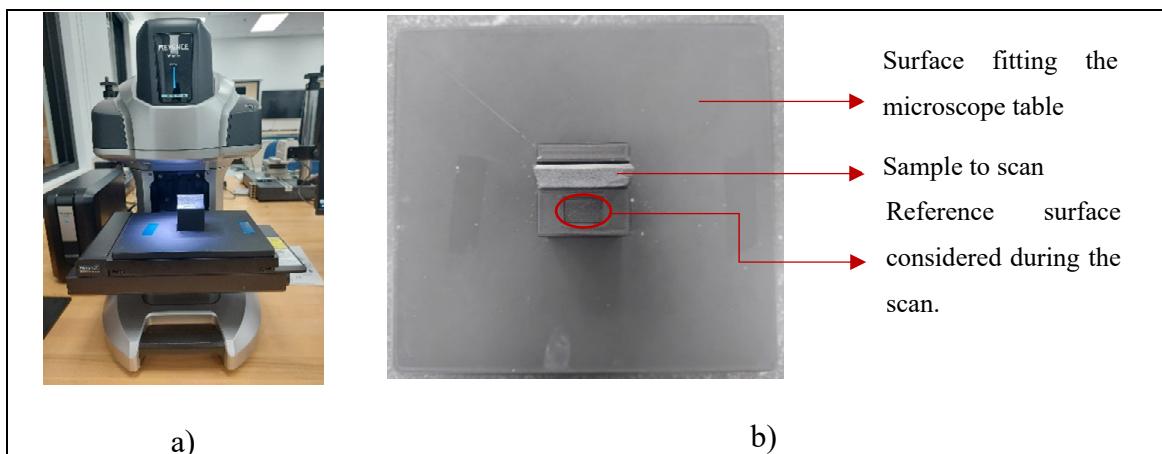


Figure-A VII-5 a) Keyence Microscopy, b) Sample holder (Metrology lab of ETS)

As for software, the Keyence software stands out for its ability to visualize and analyze images, offering a suite of advanced features such as dimension measurement, surface mapping, roughness assessment, profile analysis, and volume calculation. Software solutions offering a formidable toolset for comprehensive processing and interpretation of scan data, enabling in-depth analyses, wear quantification and invaluable wear characterization insights were used:

Polyworks, a specialized 3D metrology software dedicated to examining and processing scan data. It can efficiently manage 3D point clouds, offering features such as shape comparisons, dimensional measurements, deformation analyzes and detailed reporting. Additionally, programming and analysis platforms such as Matlab and Python play a central role, especially in data processing and complex calculations.

The quantification of wear involves several meticulous steps. Initially, a scan of the knives is performed before they experience any wear. This scan produces a digital representation of the new knives in their pristine state. The knives are positioned on a specially designed support to maintain their position and ensure precise, consistent scanning. This scanning process is executed using the Keyence microscope. The resultant data acts as a visual and geometric reference, making it possible to compare the knife's condition before and after usage and subsequently assess the extent of wear on the cutting edge. This pre-wear scan forms an essential foundation for tracking knife wear progression and quantifying changes over time.

After their usage in wood-cutting operations, the knives are scanned again. After their stint in cutting, the knives are removed from the machine and positioned on the support to ensure stability during the scan. Scanning the worn knives provides a digital depiction of the cutting edge post its exposure to the cutting action. This scan visualizes geometric changes and identifies wear signs such as deformation or cutting-edge fracture. By analyzing post-wear scans, wear can be quantified, revealing the state of wear progression.

The edge of a new cutting tool is the sharp area that directly interacts with the material being machined. When viewed in cross-section, the configuration of the edge reveals a distinct morphology, primarily consisting of two sections. The first is the trapezoidal base that serves as a support for the cutting edge. The second is the triangular tip, representing the effective cutting edge of the tool. The volume of this edge ($VE_{Theoretical}$) can be estimated by calculating the volume of the trapezoid and adding it to the volume of the triangular tip (Figure6). In this context, b is the base of the triangle and also the shorter base of the trapezoid, B is the longer base of the trapezoid, h is the height of the triangle, and h' is the height of the trapezoid. This leads us to the formula defined by equation (1).

$$\text{Volume of edge} = VE_{\text{theoretical}} = \left[\left(\frac{b \times h}{2} \right) + \left(\frac{(B + b) \times h'}{2} \right) \right] \times L \quad (\text{A VII-1})$$

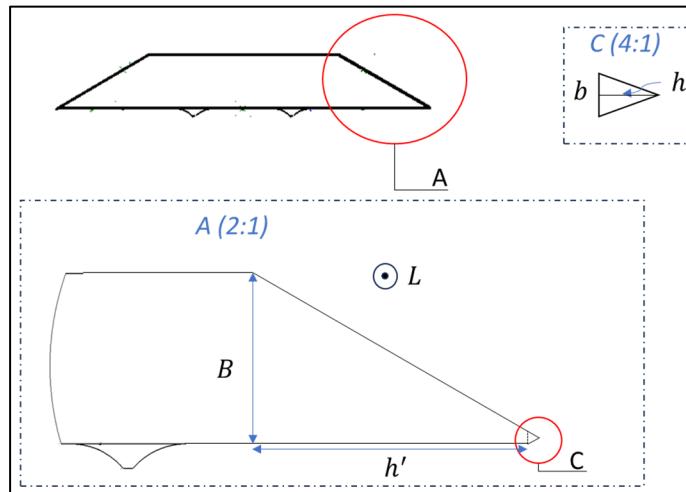


Figure-A VII-6 Presentation of the cutting edge

Experimental case studies

This section aims to assess the wear of squaring knives using the proposed approach. Before their deployment and after specific usage intervals, culminating at 100 hours, the knives are subjected to scanning. Wear assessment is carried out by analyzing the scans obtained with the Keyence microscope, comparing the pre- and post-wear profiles. This analysis allows for tracking the wear's progression over time. The scanning process with the Keyence takes approximately 30 minutes. To address reflection issues, a powder is applied to the knife's surface.

Firstly, two batches of labeled knives were provided to us by the industrial partner, then scanned under a microscope:

- Batch #1 (V1) – contains 4 samples (A8 steel modified with 1% tungsten) without coating and with a cut edge.

- Batch #2 (V2) – contains 4 samples (A8 steel modified with 1% tungsten) with coating and a cut edge.

Next, the scanned samples were used in real conditions, being mounted on two distinct squaring heads, one for the uncoated knives and another for the coated knives. Over a week, the knives were subjected to regular working conditions, and samples were taken at 24-hour intervals to assess their wear level (e.g., V1.1.28h, V1.2.52h, V1.3.76h; V1.4.100h).

This procedure was repeated for the samples. Table 1 displays the knife sample identification. Once the knives reached the desired hourly range, they were once again scanned under the Keyence microscope. The knives are then scanned under the Keyence microscope, and the scans are saved for further analysis.

Tableau-A VII-1 Identification of knife samples

Batch	Quantity	Machining +Heat treatment	Coating	Initial identification	Final identification
V1	5	✓		V1.1; V1.2 ; V1.3 ; V1.4	V1.1.28h; V1.2.52h; V1.3.76h; V1.4.100h
V2	5	✓	✓	V2.1; V2.2 ; V2.3 ; V2.4	V2.1.28h; V2.2.52h; V2.3.76h; V2.4.100h

Finally, the comparison between pre- and post-wear scans allows for the calculation of the lost volume and determination of the knives' wear profile.

Results

Digitilization of samples

The process of scanning knives before wear involves capturing a digital image of the new knives before they are used. This process enables the acquisition of a precise digital representation of the initial condition of the knives, devoid of any wear. The knives are placed on a specially designed holder to stabilize their position, ensuring accurate and consistent scanning. This scanning is carried out using a high-resolution microscope. The gathered data serve as a visual and geometric reference for comparing the state of the knives before and after use, to evaluate the extent of wear on their cutting edges. This initial scanning step is crucial for the analysis of the wear progression of the knives and for quantifying the changes over time. Figure 7-a shows an example of pre-wear scanning performed using a high-resolution microscope.

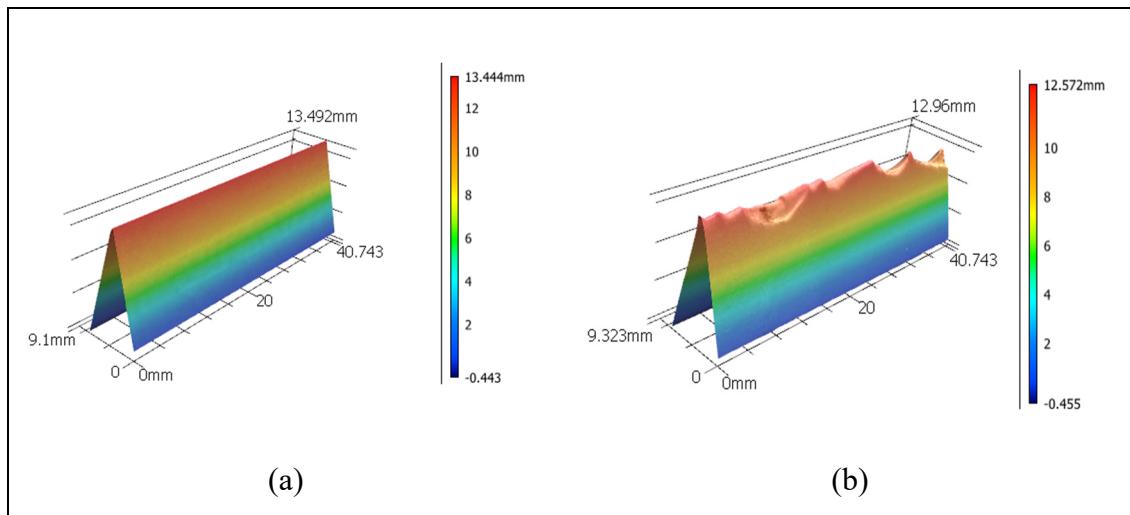


Figure-A VII-7 a) Scan of the initial knife edge, b) Scan of knife edge after wear

The scanning of knives post-wear entails scanning the knives following their use. After being employed in wood-cutting operations, the knives are removed from the machine and positioned on a holder to ensure stability during scanning. By scanning the worn knives, a digital image of the edge's state after exposure to cutting operations is obtained, as depicted in Figure7-b.

These scans allow for the visualization of geometric alterations and the identification of wear signs such as deformation or fracturing of the cutting edge. Examining the scans of knives post-wear facilitates the quantification of wear and the observation of changes in the knife's wear state. Figure 8 displays the scans of both new and worn knives at 28 hours and 100 hours coating and uncoating.

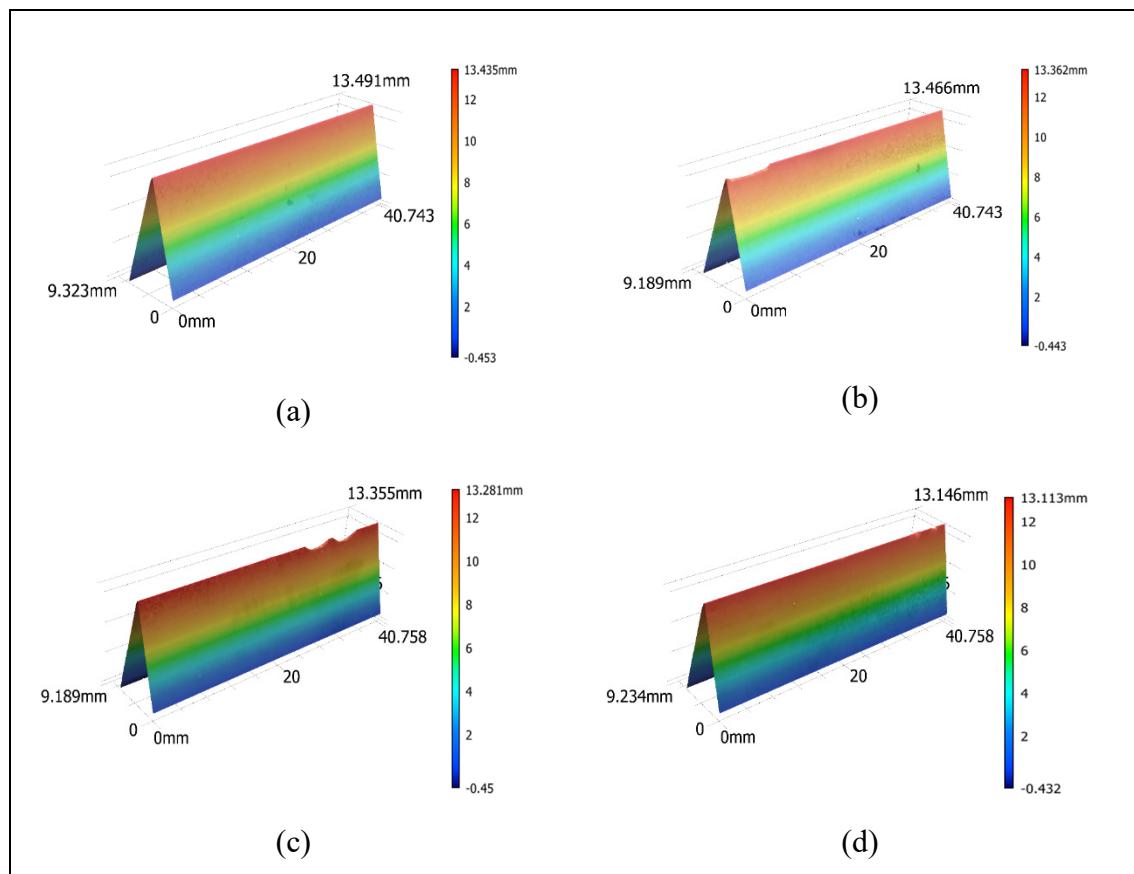


Figure-A VII-8 Knife scans uncoating (a) V1.1.28h, (c) V1.4.100h, and coating (b) V2.2.28h, (d) V2.4.100h

Post treatment and profile measurement

To further quantify wear, one must determine the volume of wear. This involves comparing the volume difference before and after wear. Several methods facilitate this volume determination. The primary method employs the volume calculation function in the Keyence microscope software. Alternatively, knife scans can be exported as 3D stl files, enabling use in software

like PolyWorks, MATLAB/Python, CloudCompare, etc. Such software provides advanced 3D data analysis capabilities, inclusive of precise volume computation. Another approach overlays pre and post-wear 3D files, visually highlighting the shape and material loss quantity. These techniques enable an accurate determination of the wear volume and the assessment of wear magnitude on the cutting surface. The wear rate, indicative of the wear speed during knife usage, is another vital metric. Expressed as material loss per time unit, it's calculated by measuring the volume difference pre and post knife usage and dividing it by the usage duration. This rate evaluates tool efficiency and longevity and contrasts different machining techniques or tool materials. A high wear rate could suggest frequent tool replacements or mandate machining parameter adjustments to prolong tool lifespan. Lastly, the wear profile, referring to the wear shape or pattern that evolves on a cutting tool's surface over time, provides insights into tool-material interaction during cutting. Influenced by factors like the material being cut or the tool's properties, the wear profile can exhibit chip-shaped wear, sharp-edged wear, or irregular wear. Utilizing the Keyence microscope software for wear profile analysis offers invaluable insights into tool performance and cutting quality. The edge profile measurements parameters are shown.

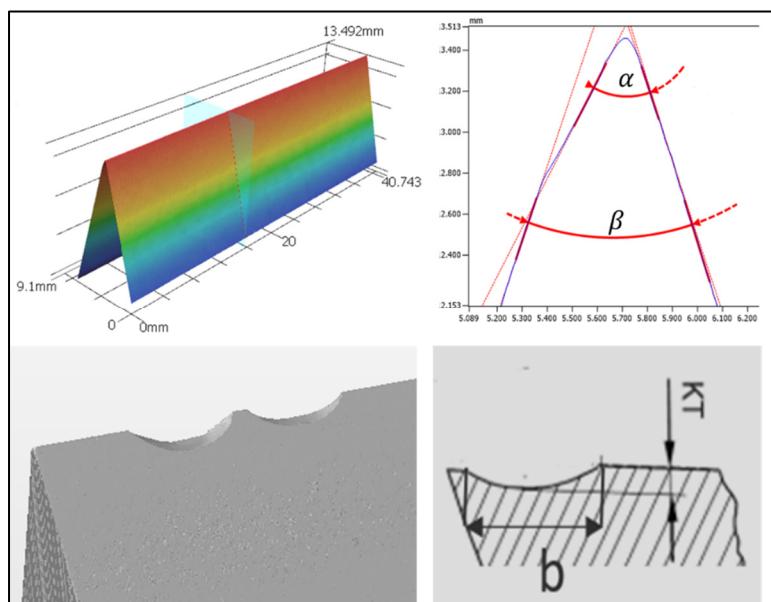


Figure-A VII-9 Edge profile measurement parameters:
 α - tool tip angle, β - cutting edge angle,
 KT -wear depth, b -wear width

The wear profile refers to the shape or wear pattern that emerges on the cutting surface of a tool over time. This profile is analyzed to understand the interaction between the tool and the material during the cutting process. The wear profile can vary based on several factors, such as the type of material being cut and the inherent properties of the tool itself. It can display different characteristics, such as chip-shaped wear, sharp edge wear, or irregular wear patterns (Zmitrowicz, 2006). The analysis of this profile, conducted using the microscope software, provides us with invaluable data crucial for characterizing tool wear.

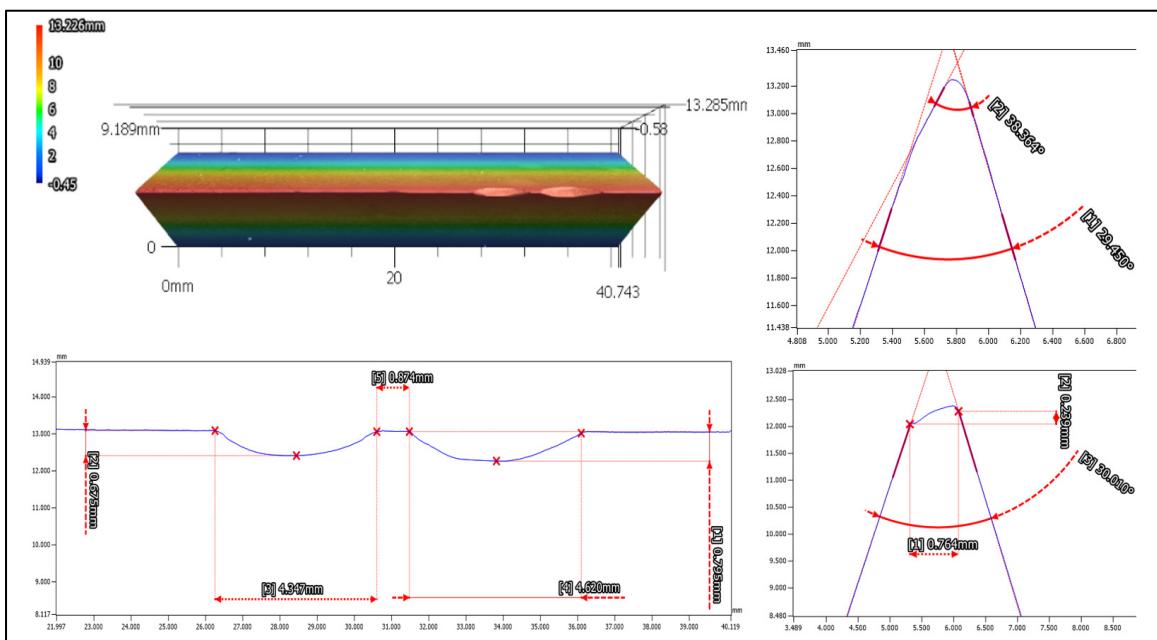


Figure-A VII-10 Measure of profile

The following Table shows the results of parameters obtained after profile measurement.

Tableau-A VII-2 Results of parameters obtained after profile measurement

Sample ID	Working Time (h)	KT (mm)	b (mm)	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
V1.1	28	-	-	39.953	29.646
V2.1		0.599	6.441	38.198	29.413
V1.2	52	-	-	39.451	29.79
V2.2		-	-	42.461	30.207
V1.3	76	-	-	39.33	30.421
V2.3		0.185	3.375	40.141	30.249
V1.4	100	0.795	4.62	38.364	29.45
V2.4		-	-	39.892	30.608

Estimation of lost volume

The lost volume (VER) serves as an indicator for the wear of knives. It is determined by calculating the difference between the initial volume of the knives before wear ($VE_{before\ wear}$) and the final volume after a specified period of use ($VE_{after\ wear}$). This measurement helps to evaluate the amount of material eroded due to wear.

While the microscope software provides a volume calculation function, for deeper analysis, one can export the data in 3D STL format. This data can then be examined with specialized software such as PolyWorks or MATLAB. Overlaying the 3D models before and after wear provides a direct visualization of material loss. Equation (2) presents the formula for volume lost (VER).

$$VER = VE_{before\ wear} - VE_{after\ wear} \quad (\text{A VII-2})$$

The results pertaining to the lost material volume are presented in the Table 3.

Tableau-A VII-3 Measurement results of the cutting edges' volumes

Sample ID	Working Time (h)	$VE_{before\ wear}$ (mm ³)	$VE_{after\ wear}$ (mm ³)	VER (mm ³)
V1.1	28	2600.52	2595.28	5.23
V2.1		2603.99	2590.51	13.48
V1.2	52	2593.88	2574.00	19.88
V2.2		2596.55	2588.54	8.01
V1.3	76	2571.81	2539.27	32.54
V2.3		2588.04	2577.65	10.39
V1.4	100	2595.52	2574.38	21.14
V2.4		2606.08	2579.43	26.65

The analysis of the results shows a notable variation in the wear rate between 28 and 76 hours for the uncoated knives, and between 52 and 100 hours for the coated knives. Generally, the uncoated knives exhibit a higher wear rate compared to the coated knives. However, a reversal of this trend is noticed at 28 hours and at 100 hours. This uneven fluctuation in the wear rate can be partially attributed to material removal caused by the presence of foreign elements such as sand particles on the logs being processed. Additionally, a fragility of the cutting edge is observed at the spots where material removal occurs. Some knives also experienced deformations due to impacts with particles found on the wood.

Lost volume due to wear excluding chippings

To evaluating the wear of the knives, considering only the worn and not chipped areas, a calculation of the lost volume or volume edge recession (VER) was carried out focusing on a specific 5 mm zone of the tool's cutting edge. This zone corresponds to the portion of the tool worn by abrasion during machining. By comparing the volume before and after wear, it's possible to estimate the amount of material lost in this specific zone. Figure 11 clearly illustrates the considered zone.

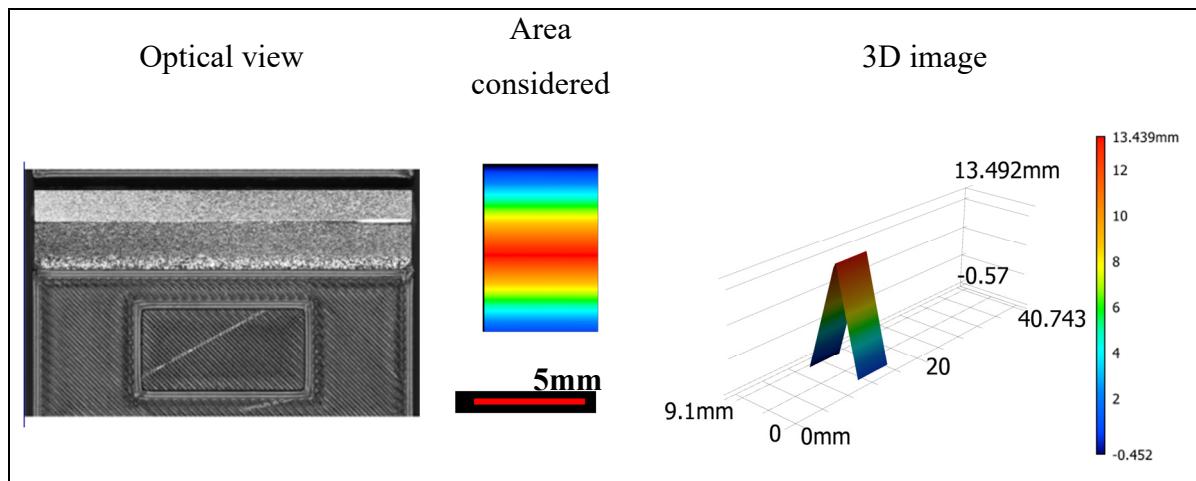


Figure-A VII-11 Specific area delineated for the estimation of lost volume

The collected data is displayed in table 4 and depicted in figure 12, showcasing the progression of wear on the knives, whether coated or uncoated, for the steel type A8 mod+1%W, over time.

When examining the lost volume due to wear over time (from 28h to 100h), while excluding the chipped parts, that is the first 5 millimeters of the cutting edge, it's observed that the wear increases similarly for both coated and uncoated knives during the initial 52 hours. Following this, the wear becomes more pronounced for the uncoated knives. This observation suggests that the coating applied on the knives helps to extend their lifespan and reduce long-term wear.

Tableau-A VII-4 Results of the measurement of cutting-edge volumes due to wear excluding chippings

Sample ID	Working Time (h)	$VE_{Before\ wear}$ (mm^3)	$VE_{after\ wear}$ (mm^3)	VER (mm^3)
V1.1	28	302.28	299.24	3.04
V2.1		310.92	307.80	3.13
V1.2	52	302.34	297.58	4.76
V2.2		310.57	305.38	5.19
V1.3	76	305.56	296.65	8.91
V2.3		310.74	303.22	7.52
V1.4	100	302.28	291.30	10.98
V2.4		311.43	303.41	8.02

The following figure shows the evolution of wear over time.

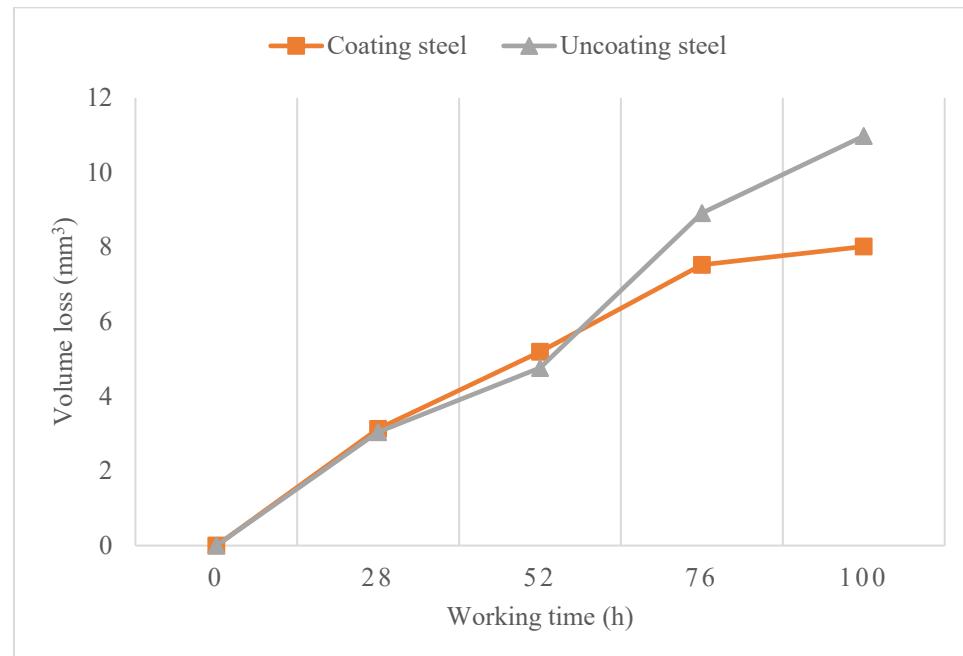


Figure-A VII-12 Wear of squaring knives over time

Discussion

The wear quantification methodology implemented in this study is robust and allows for a detailed analysis of tool steel wear. Scans before and after wear provide a clear and precise representation of the knife's condition at various stages of its use, enabling a detailed comparison of wear over time. It is semi-automatic, which implies a reduction in human errors and the potential for increased measurement reproducibility. Crucially, this method encompasses the entire edge, providing a more holistic representation of wear. Additional information, such as lost volume and wear profile, can also be extracted, offering a deeper understanding of wear dynamics and severity. Furthermore, the non-destructive nature of this methodology is particularly advantageous, preserving the sample for future analyses.

It is worth noting that if we had used the usual point-by-point measurement method (S. C. Ghosh et al., 2015) or direct measurement of tool geometry (Sheikh-Ahmad et al., 2003), (Porankiewicz et al., 2005), (McKenzie & Karpovich, 1975))based on cross-sectional cuts of worn knives, we would not have been able to consider the entire worn edge. This could lead to an underestimation or overestimation of wear, given the potential heterogeneity of wear along the edge. Another major drawback of this method is its destructive nature, requiring sample cutting. This not only compromises the sample's integrity for future studies but also increases the time and costs associated with sample preparation. Therefore, this approach would not have allowed us to obtain a comprehensive analysis of tool steel wear.

The results presented offer a comprehensive view of wear progression in wood-cutting tools. The innovative methodology, based on high-resolution microscopy and detailed software analysis, offers a level of precision and depth unmatched by traditional 2D methods. The adaptability of the methodology, allowing for data processing across multiple software platforms, augments its versatility.

The results obtained regarding tool wear over time clearly demonstrate an increase in wear with time, with notable differences between coated and non-coated knives. Non-coated knives generally exhibit a higher rate of wear, although non-uniform variations are observed, likely

attributed to variations in machining conditions and the presence of impurities in the wood, such as sand particles (Heidari, 2019).

The wear mechanisms, as discussed in the introduction, find practical manifestations in the presented results. The abrasive wear, characterized by hard particles sliding or rolling over surfaces, is potentially the predominant wear type observed. This is corroborated by the wear patterns visualized in the scans, especially in zones subjected to direct friction with wood.

The experimental section, particularly the choice of using coated and uncoated knives, offers a comparative perspective on wear resistance. The observed trend, where uncoated knives showcase a pronounced wear post the 52-hour mark compared to coated knives, underscores the protective efficacy of coatings (Aramcharoen et al., 2008). This observation aligns with the discussed wear mechanisms, where coatings potentially mitigate adhesive and corrosive wear by acting as barriers to physico-chemical interactions and environmental corrosive agents.

However, it's important to note the observed fluctuations in wear rate, potentially attributed to foreign particles like sand. This introduces an element of variability in the wear process, emphasizing the multifaceted challenges wood-cutting tools face. The observed edge fragilities, especially at spots experiencing pronounced material removal, underline the intricate interplay of abrasive and impact wear.

In conclusion, the proposed methodology offers a robust and precise approach to wear quantification in wood-cutting tools. The depth and rigor of the analysis, combined with the practical implications of the findings, make this research invaluable for the wood industry. The insights gained not only enhance our understanding of wear progression but also provide actionable data for tool optimization.

Conclusion

Wear of cutting tools plays a pivotal role in the efficiency and profitability of the wood industry. This study introduced an innovative methodology for the precise quantification of wear, leveraging high-resolution microscopy and advanced software analysis techniques. Through experimental case studies, we showcased the capability of this methodology to provide detailed insights into wear progression while highlighting the protective efficacy of coatings on knives.

The results obtained underscore the significance of the wear mechanisms discussed, such as abrasive wear, while emphasizing the impact of foreign particles and fatigue on the wear process. By focusing on a specific 5 mm zone of the tool's cutting edge, the analysis unveiled significant trends and valuable insights into the granular nature of wear.

The implications of this research are vast for the wood industry. A better understanding and quantification of wear can guide tool optimization, enhance the quality of the finished product, and potentially reduce machining costs. Moreover, findings regarding the efficacy of coatings could lead to innovations in crafting more durable cutting tools.

In sum, this study illuminates the crucial importance of research and development in the realm of wear quantification. As the wood industry continues to grow and evolve, robust and precise methodologies like the one presented here will be essential in supporting efficient, cost-effective, and sustainable production.

These recommendations suggest potential avenues for further exploration and enhancement of the current study, aiming for a more holistic understanding of tool wear mechanisms and assessment techniques:

- **Linking Observed Damages to Physical Phenomena:** Investigate how the observed tool wear can be directly linked to specific physical wear mechanisms.
- **Deep Dive into Coatings:** While the article briefly touched upon the role of coatings in wear resistance, there's potential for a more comprehensive study on various coatings, their properties, and how they interact with different wood species.

- Comparative Analysis of 3D Methodology: A detailed comparative study could be undertaken to understand how the new 3D method stacks up against existing wear measurement techniques, pinpointing its advantages or possible shortcomings.
- Expanding Beyond Wood: Although the primary focus was on wood, could this methodology be applied to other materials? Exploring its potential applicability in other industries might provide broader insights.

Reference

- ABDELALI, H. B., SALEM, W. B., RECH, J., DOGUI, A., & KAPSA, P. (s.d.). Corrélation des mécanismes d'usure en frottement et en usinage de l'acier AISI 1045.
- Achour, A. (2006). Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement.
- Affatato, S., & Brando, D. (2013). Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants. Dans *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints* (pp. 3-26). (S.1.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096128.1.3>
- Aghababaei, R., Warner, D. H., & Molinari, J.-F. (2016). Critical length scale controls adhesive wear mechanisms. *Nature communications*, 7(1), 11816.
- Aknouche, H., Outahyon, A., Nouveau, C., Marchal, R., Zerizer, A., & Butaud, J.-C. (2009). Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood. *journal of materials processing technology*, 209(6), 2918-2922.
- Ameur, T., Assas, M., & Mazouz, H. (2007). Optimisation des paramètres de coupe en utilisant l'algorithme à essaim de particules. *Matériaux & techniques*, 95(6), 371-380.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P. T., Yang, S., Cooke, K. E., & Teer, D. G. (2008). Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(14), 1578-1584. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>
- Astakhov, V. P. (2004). The assessment of cutting tool wear. *International journal of machine tools and manufacture*, 44(6), 637-647.

- ATIBT, A. T. I. D. B. T. (2016). LES NIVEAUX DE TRANSFORMATION DU BOIS. Repéré à <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/04/Les-niveaux-de-transformation-du-bois-2017-ATIBT-FR-ENG.pdf>
- Barrow, G. (1972). Wear of cutting tools. *Tribology*, 5(1), 22-30.
- Bayer, A. M., & Becherer, B. A. (1989). High-Speed Tool Steels. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 51-59). (S.1.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002121>
- Bayoumi, A.-M., Bailey, J. A., & Stewart, J. S. (1983). Comparison of the wear resistance of various grades of cemented carbides that may find application in wood machining. *Wear*, 89(2), 185-200.
- Bencheikh, I. (2018). *Simulation multi-étapes de l'usure des outils de coupe revêtus par une modélisation XFEM/Level-set*. Université de Lorraine.
- Black, J. T. (1989). Mechanics of Chip Formation. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 7-12). (S.1.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002117>
- BÖHLER K329. (2023). Repéré à <https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/k329/>
- BÖHLER W360 ISOBLOC. (2023). Repéré à <https://www.bohler.fr/fr/products/w360isobloc/>
- BOUHAMLA, K. (2009). *Étude de l'influence de la composition chimique sur la formation de la structure et la tenue à l'usure des fontes au chrome*. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Bourbonnais, R. (2003). *Econométrie* (Vol. 4). (S.1.) : Dunod.
- Bourithis, L., & Papadimitriou, G. D. (2009). The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique. *Wear*, 266(11-12), 1155-1164.
- BOUZID, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13*.
- Brajčinović, S., Begić Hadžipapić, A., & Medved, J. (2022). Inhibitory Effect of Commercial Inhibitor VCI 379/611 on the Corrosion Behaviour of HTCS-130 Tool Steel for Hot Work. *Metals*, 12(6), 966. <https://doi.org/10.3390/met12060966>
- Brink, T., & Molinari, J.-F. (2019). Adhesive wear mechanisms in the presence of weak interfaces: Insights from an amorphous model system. *Physical Review Materials*, 3(5), 053604.

- Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., León, L. M., & Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259(1-6), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>
- Canale, L. C. F., Albano, L., Totten, G. E., & Meekisho, L. (2014). Hardenability of Steel. Dans *Comprehensive Materials Processing* (pp. 39-97). (S.l.): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01219-X>
- Cayer-Barrioz, J. (2003). *Mécanismes d'usure de polymères orientés: Application à l'abrasion des fibres de polyamide*. Ecully, Ecole centrale de Lyon.
- Čerče, L., Pušavec, F., & Kopač, J. (2015). 3D cutting tool-wear monitoring in the process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 3885-3895.
- Chafik Labidi. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech. Repéré à {NNT : 2006ENAM0058}. {pastel-00002491}
- Czibula, C., Seidlhofer, T., Ganser, C., Hirn, U., & Teichert, C. (2021). Longitudinal and transverse low frequency viscoelastic characterization of wood pulp fibers at different relative humidity. *Materialia*, 16, 101094.
- da Silva, L. J., Scheuer, C. J., & D'Oliveira, A. S. C. (2019). Effect of microstructure on wear performance of NiCrSiBC coatings. *Wear*, 428, 387-394.
- Dawson, T. G., & Kurfess, T. R. (2005). Quantification of tool wear using white light interferometry and three-dimensional computational metrology. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5), 591-596.
- Dearnley, P. A., & Aldrich-Smith, G. (2004). Corrosion-wear mechanisms of hard coated austenitic 316L stainless steels. *Wear*, 256(5), 491-499.
- DJAFRI, M. (2015). *Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant-application aux freins à disques*. University of sciences and technology in Oran.
- DK-SPEC portfolio outils de coupe. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/outils-coupe-industriels.html>
- DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseur. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/tetes-equarisseur.html>
- Dolinšek, S., Šuštaršič, B., & Kopač, J. (2001). Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. *Wear*, 250(1-12), 349-356.
- Eyre, T. S. (1981). Wear mechanisms. *Powder Metallurgy*, 24(2), 57-63.

- Faga, M. G., & Settineri, L. (2006). Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3002-3007. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.013>
- Feng, K., Smith, W. A., Borghesani, P., Randall, R. B., & Peng, Z. (2021). Use of cyclostationary properties of vibration signals to identify gear wear mechanisms and track wear evolution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107258.
- Ghosh, S. C., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Effect of knife wear on surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter. *Wood and Fiber Science*, 47(4), 355-364.
- Ghosh, Shyamal C., Heidari, M., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Patterns of knife edge recession in an industrial chipper-canter. *Forest Products Journal*, 65(7-8), 358-364.
- Grenier, M. (1998). *Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane*. (S.l.) : Université Laval.
- He, F. J., Fang, Y. Z., & Jin, S. J. (2014). The study of corrosion-wear mechanism of Ni-W-P alloy. *Wear*, 311(1-2), 14-20.
- Heidari, M. (2019). *Improvement of cutting tool life for the primary transformation of wood*. Thèse de Doctorat. Université Laval, Québec, Canada. Repéré à <http://hdl.handle.net/20.500.11794/35717>
- Hernandez, R. E., & Lessard, J. (1997). Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter. *Forest products journal*, 47(3), 89.
- Hernandez, R. E., & Quirion, B. (1993). Effect of a chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce. *Forest Products Journal*, 43(9), 8.
- Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement: durabilité de la récolte de bois d'œuvre*. (2022). Gatineau QC : Environnement et changement climatique Canada = Environment and Climate Change Canada.
- International, A. (2004). *ASTM G65-04 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. (S.l.) : ASTM International West Conshohocken.
- Ionescu, C. C. (2012). *Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr*. Ecole Centrale Paris.
- Jakub, S., Bartosz, P., & Grzegorz, K. (2011). Measurement of the Cutting Tool Edge Recession with Optical Methods. Dans *Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar, Skellefteå, Sweden, 11p*.

- Jurkovic, J., Korosec, M., & Kopac, J. (2005). New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1023-1030.
- Kant, G., & Sangwan, K. S. (2014). Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. *Journal of cleaner production*, 83, 151-164.
- Kato, K. (2005). Classification of wear mechanisms/models. *Wear—materials, mechanisms and practice*, 9-20.
- Kato, Koji, & Adachi, K. (2000). Wear mechanisms. Dans *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology* (pp. 273-300). (S.l.) : CRC press.
- Kendall, L. A. (1989). Tool Wear and Tool Life. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 37-48). (S.l.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002120>
- Kharrat, M., Baccar, M., & Dammak, F. (Éds). (2020). *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics: selected contributions from the 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM 2019, December 16-18, 2019, Hammamet, Tunisia*. Communication présentée au International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, Cham : Springer.
- Klamecki, B. E. (1979). A review of wood cutting tool wear literature. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 37(7), 265-276. <https://doi.org/10.1007/BF02607429>
- Knotek, O., Lugscheider, E., Löffler, F., Krämer, G., & Zimmermann, H. (1994). Abrasive wear resistance and cutting performance of complex PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 68-69, 489-493. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90206-2](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90206-2)
- Komotori, J., Hisamori, N., & Ohmori, Y. (2007). The corrosion/wear mechanisms of Ti-6Al-4V alloy for different scratching rates. *Wear*, 263(1-6), 412-418.
- Kovaříková, I., Szewczyková, B., Blaškovič, P., Hodúlová, E., & Lechovič, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.
- Kowaluk, G., Szymanski, W., Palubicki, B., & Beer, P. (2009). Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(2), 173-176.
- Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. (S.l.) : Asm International.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. *Environments*, 5, 34.

- Labidi, C., Collet, R., Nouveau, C., Beer, P., Nicosia, S., & Djouadi, M. A. (2005). Surface treatments of tools used in industrial wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 200(1), 118-122. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.098>
- Labidi, Chafik. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Arts et Métiers ParisTech.
- Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F., & Man, H. C. (2000). Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 203-207. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00410-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00410-0)
- Lee, J.-H., Myagmar, G., Kwon, H.-B., & Han, J.-S. (2022). A digital method for wear volume loss analysis using a single-scan three-dimensional dataset. *Journal of Dental Sciences*, 17(1), 638-641.
- Mair, L. H., Stolarski, T. A., Vowles, R. W., & Lloyd, C. H. (1996). Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. *Journal of dentistry*, 24(1-2), 141-148.
- Mäkinen, T., Halonen, A., Koivisto, J., & Alava, M. J. (2022). Wood compression in four-dimensional *in situ* tomography. *Physical Review Materials*, 6(7), L070601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.L070601>
- Mang, T., Bobzin, K., & Bartels, T. (2011). *Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication*. (S.l.) : John Wiley & Sons.
- Margerie, P. (1976). Les entreprises utilisatrices de bois. *Revue forestière française*, 28(S), 117-129.
- McKenzie, W. M., & Karpovich, H. (1975). Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material. *Wood Science and Technology*, 9(1), 59-73.
- Murray, M. J., Mutton, P. J., & Watson, J. D. (1982). Abrasive wear mechanisms in steels.
- Nasnas, D. (2021). Optimisation des paramètres d'usinage en tournage dur basée sur la température de coupe. (S.l.) : (s.n.).
- Nati, C., Spinelli, R., & Fabbri, P. (2010). Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 583-587.
- Petrica, M., Badisch, E., & Peinsitt, T. (2013). Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear*, 308(1-2), 86-94.
- Pooley, C. M., & Tabor, D. (1972). Friction and molecular structure: the behaviour of some thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 329(1578), 251-274.

- Porankiewicz, B., Sandak, J., & Tanaka, C. (2005). Factors influencing steel tool wear when milling wood. *Wood Science and Technology*, 39(3), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0282-0>
- Remadna, M., & Rigal, J. F. (2006). Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 67-75.
- Ressources naturelles Canada. (2022). Aperçu de l'industrie forestière du Canada. Repéré à <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets/industrie-commerce/apercu-lindustrie-forestiere-canada/13312>
- Ribeiro, J. E., César, M. B., & Lopes, H. (2017). Optimization of machining parameters to improve the surface quality. *Procedia Structural Integrity*, 5, 355-362.
- Roberts, G. A., Kennedy, R., & Krauss, G. (1998). *Tool steels*. (S.l.) : ASM international.
- Sassus, F., Almérás, T., Gril, J., & Yamamoto, H. (2005). Modélisation des déformations de maturation de la fibre. *arXiv preprint physics/0503205*.
- Seetharaman, S. (2005). *Fundamentals of metallurgy*. (S.l.) : Taylor & Francis.
- Sevim, I., & Eryurek, I. B. (2006). Effect of fracture toughness on abrasive wear resistance of steels. *Materials & Design*, 27(10), 911-919. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.009>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Stewart, J. S., & Feld, H. (2003). Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*, 255(7-12), 1433-1437.
- Slim, B. M. (2010). *Modélisation hybride du frottement local à l'interface outil-copeau en usinage des alliages métalliques*. Arts et Métiers ParisTech.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4. ed). Amsterdam : BH, Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Testing, A. I. C. E.-28 on M. (2019). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. (S.l.) : ASTM international.
- Tools, T.-L. T. with S.-P. T. (1993). International standards, ISO 3685–1993 (E). International Organization for Standardization Geneva.
- Vander, G. F. (2004). Metallographic techniques for tool steels. *Materials Park, OH: ASM International*, 2004., 644-669.
- Walker, J. C. (2006). *Primary wood processing: principles and practice*. (S.l.) : Springer Science & Business Media.

- Wang, S.-H., Chen, J.-Y., & Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(11), 3446-3458. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.125>
- Wei, S., & Xu, L. (2019). Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials. *Acta Metall Sin*, 56(4), 523-538.
- Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual.* (s.d.). (S.l.) : (s.n.).
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z., & Militz, H. (2013). Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. *Eur. J. Wood Wood Prod*, 71(4), 401-416.
- Zemzemi, F., Rech, J., Bensalem, W., Kapsa, P., & Dogui, A. (2007). Analyse du frottement aux interfaces pièce-outil-copeau au cours de l'usinage d'un acier 42CrMo4. Dans *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- Zmitrowicz, A. (2006). Wear patterns and laws of wear—a review. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 44(2), 219-253.

ANNEXE VIII

WEAR RESISTANCE EVALUATION OF THREE TOOL STEELS IN PRIMARY WOOD PROCESSING: A COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL OBSERVATIONS AND LITERARY PREDICTIONS

Vanella Mbakop Nanshie^a, Majid Heidari^b, Mohammad Jahazi^c

^{a,c}Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS),
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^bDK-Spec, 1060 Chem. Olivier, Lévis, Quebec, Canada G7A 2M8

Article finalisé à soumettre sous peu

Abstract

Tool steels, utilized in the wood industry, confront wear resistance challenges. This study delves into the wear resistance of various tool steels designed for wood cutting. Through microstructural analysis, pronounced differences in grain size, carbide morphology, and existing phases emerged. Specifically, the modified A8 steels, both with 0% and 1% tungsten, exhibited finer carbides compared to the coarser structure of the W360 steel. Hardness tests revealed a comparative hardness between the modified A8 steels, whereas the W360 steel presented a marginally elevated hardness. Such outcomes indicate that a steel's chemical composition and microstructure significantly influence its hardness.

In assessing wear, there were notable disparities between coated and uncoated steels. The uncoated A8 steel, containing 0% tungsten, demonstrated a susceptibility to material detachments. In contrast, the coated W360 steel boasted enhanced wear resistance. Wear tests further elucidated that when coated, the modified A8 steels experienced reduced initial mass loss. However, both the coated and uncoated W360 steels followed a linear mass loss trajectory.

Microstructural findings, coupled with hardness test results, accentuated the pivotal role of grain size and carbide nature in determining steel properties. Coatings were identified as beneficial in mitigating wear, though a thorough assessment of the compatibility between steel and coating remains crucial. These insights bear significant ramifications for the wood industry, directing both steel and coating choices to maximize tool lifespan. In essence, this research offers a comprehensive exploration of tool steel wear during wood processing, emphasizing the critical contribution of coatings in bolstering knife wear resistance, even amidst demanding conditions. Thus, the judicious selection of steel and the strategic application of coatings are essential for optimizing both tool durability and the quality of the finished product.

Keywords: Wear, Abrasive wear, wear Mechanisms, wear resistance, wood

Introduction

Wood machining, despite its relatively lower hardness compared to other materials such as metals and plastics, holds a prominent position in the global industrial landscape. The growth of MDF production in China and innovations in wood construction in Canada are testament to this (Chafik Labidi, 2006). However, wood machining faces significant challenges, particularly the premature wear of tools. This wear leads to increased production costs, interruptions, and can compromise the quality of the final product. Wood, as a raw material, showcases complexity due to its intrinsic variability, necessitating meticulous attention during its machining ((Hernandez & Quirion, 1993);(Hernandez & Lessard, 1997)).

Chipper canter, essential for wood transformation, exemplify this complexity. They convert large logs into wood chips and boards, requiring both sharp and durable tools. Figure 1 illustrates the chipper canter heads and the corresponding knives.

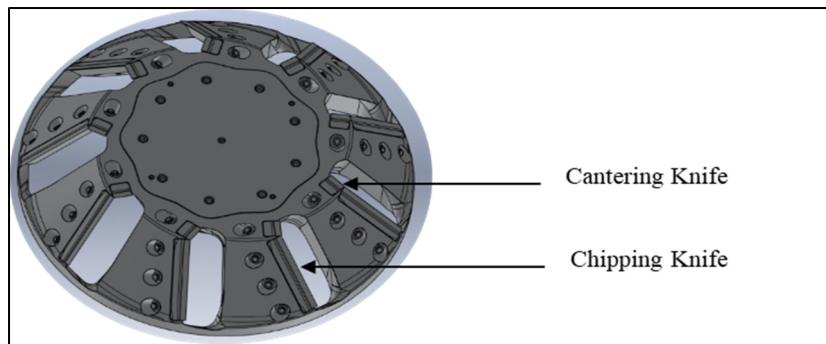


Figure-A VIII-1 Chipper -canter head
Tirée de « DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseuses » (2023)

These tools undergo intense mechanical and chemical stresses, resulting in wear with significant economic implications for the industry ((Walker, 2006);(« DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseuses », 2023)). This wear typically arises from a combination of mechanisms, including abrasion, adhesion, fatigue, and corrosion, all influenced by a variety of factors ((Koji Kato & Adachi, 2000);(Eyre, 1981);(Mair et al., 1996)).

Abrasion is the removal or deterioration of the tool material due to the relative hardness and abrasiveness of the wood. Knots, inclusions, and grain variations in wood can intensify this type of wear (Kovaříková et al., 2009). Adhesion occurs when fragments of the wood adhere to the tool surface, leading to localized welding and subsequent tearing away of the tool material (Affatato & Brando, 2013). Fatigue is manifested by Repeated mechanical stresses, especially during cyclic loading and unloading in the cutting process, can result in microscopic cracks, eventually leading to chipping or fracturing of the tool edge (Stachowiak & Batchelor, 2014) And Corrosion is Chemical interactions between the tool and the wood, especially in woods with high moisture or specific resins, can lead to corrosion, further weakening the tool material (Mair et al., 1996). These mechanisms are illustrated in Figure.

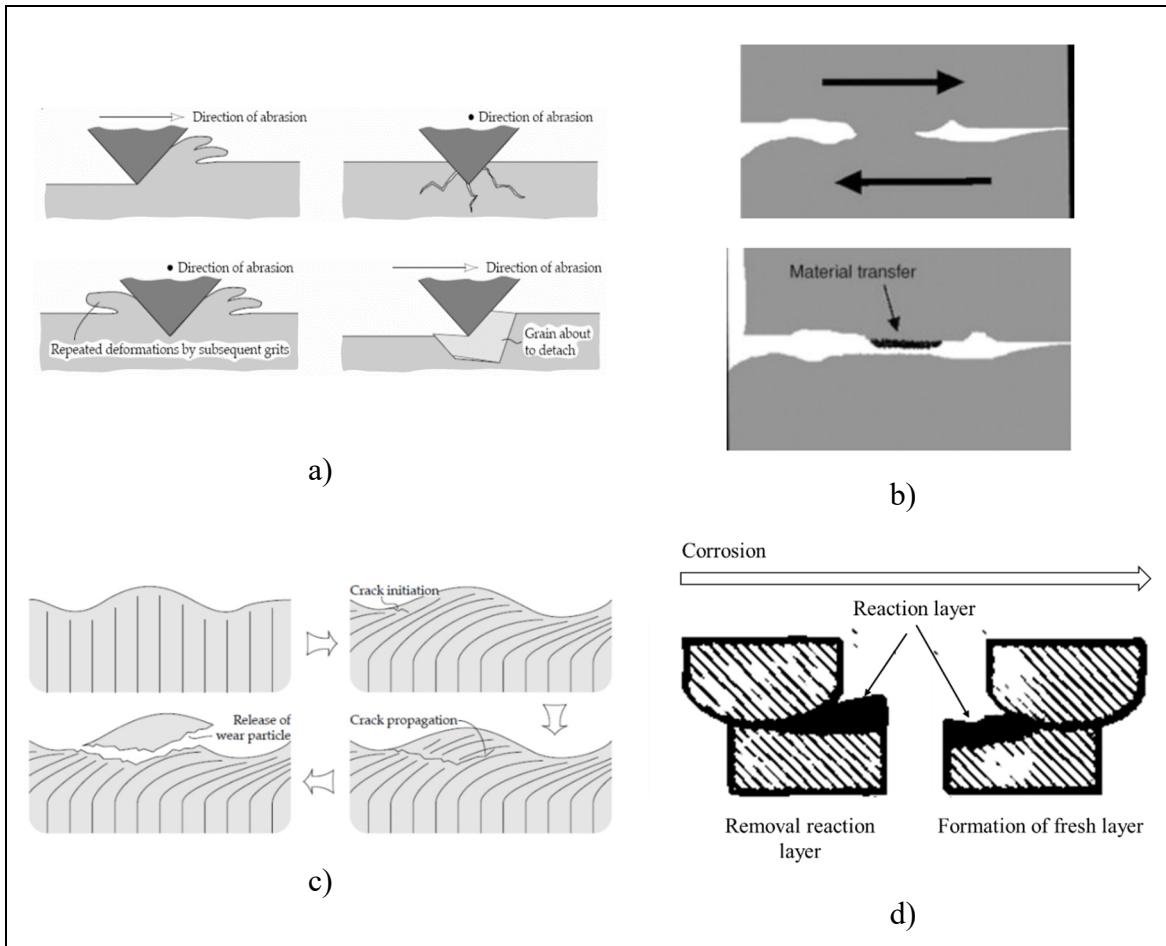


Figure-A VIII-2 Wear mechanisms : a) Abrasion, b)Adhesive wear, c) Fatigue wear, d) corrosive wear

Tirée de a) Kovaříková et al., (2009) b) Affatato & Brando, (2013), c) Stachowiak & Batchelor, (2014), d) Mair et al (1996)

During the machining process, two main types of tool edge wear are observed: wear on the rake face and clearance wear. Wear on the cutting face occurs when the tool material is eroded at the surface directly in contact with the wood. It is exacerbated by friction, cutting forces, and high temperatures generated during the process ((Barrow, 1972)). Clearance wear, manifesting on the tool's lateral face, is induced by shearing and friction forces, potentially weakening the tool and reducing its effectiveness ((Astakhov, 2004);(Dolinšek et al., 2001)).

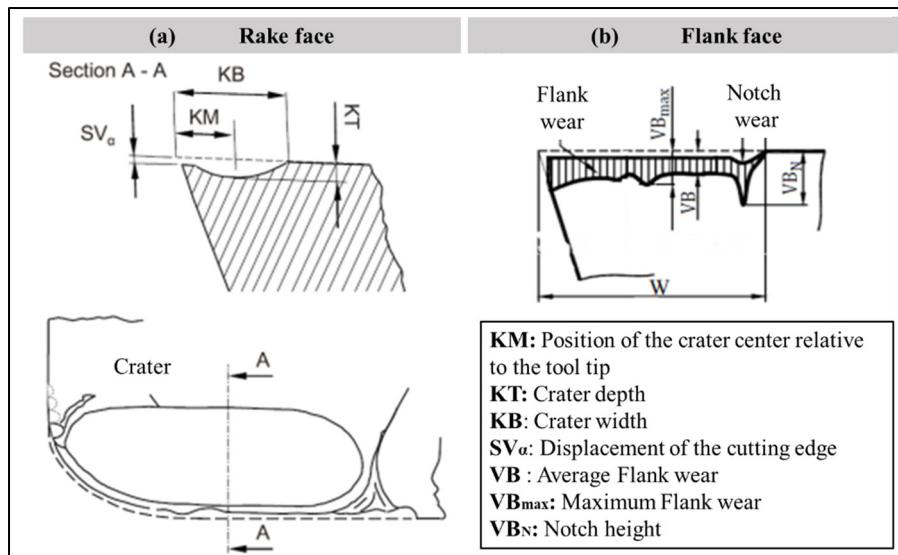


Figure-A VIII-3 Wear parameters according to ISO 3685 standard
Tirée et adaptée de Bencheikh (2018)

Tool durability is contingent on various factors. Tool design, its rigidity, and that of the machine-piece system are pivotal. Optimal tool positioning is essential to ensure its longevity, and any deviation in this positioning can hasten its wear ((Kendall, 1989);(S. C. Ghosh et al., 2015)). Operational conditions, such as the state of the machine-tool, also influence tool lifespan. Poorly maintained machines can induce detrimental vibrations.

The tool material, whether high-speed steel, coated steel, or carbide, directly impacts its wear resistance. The tool's geometry, microstructure, and manufacturing process are also crucial. An inappropriate clearance angle or poorly adjusted rake angle can intensify stress points, resulting in increased wear (Lau et al., 2000). Manufacturing quality, including heat treatments and coatings, plays a paramount role in tool resistance ((Sevim & Eryurek, 2006);(Wei & Xu, 2019)).

Wood, as a material to be machined, possesses unique characteristics that can accelerate tool wear. Its relative hardness, abrasiveness, and sensitivity to moisture, combined with potential knots and inclusions, place additional stresses on tools ((Chafik Labidi, 2006);(Klamecki, 1979);(Porankiewicz et al., 2005)). The tool-machine interaction is also a key factor in tool

wear. Friction, variations in properties of the workpiece, and cutting conditions can all contribute to accelerated wear ((Zemzemi et al., 2007);(Slim, 2010); (ABDELALI et al., s.d.)). The major issues encountered in the wood industry include premature wear, primarily caused by the ductility of steel material, and breakage, resulting from impacts by foreign objects such as nails, beads, stones, etc. (C. Labidi et al., 2005). In the context of the wood industry, various wear mechanisms are observable, such as abrasion, chipping, cracking, and deformation. According to Heidari's(Heidari, 2019) observations in 2019, the predominant wear mechanism in this field is abrasive wear.

Bayoumi et al (Bayoumi et al., 1983)conducted comprehensive research on the wear of cemented tungsten carbide cutting tools during wood machining, especially green wood with high moisture content. In contrast to traditionally assumed wear mechanisms like tool edge chipping, abrasion, and electrochemical attack, the authors identified a new wear process primarily involving the gradual rounding of the tool's nose. This phenomenon is attributed to a chemical reaction between the tool's binder (cobalt) and the extractives (tannins) present in wood, leading to the loss of tungsten carbide grains when the bond can no longer withstand the shear forces generated during cutting. This study provides an innovative understanding of the specific wear mechanism for wood cutting tools, distinctly different from wear mechanisms encountered in metal machining.

Furthermore, the study's findings demonstrate that wear depends on the type and quantity of binder present in the cemented carbide and the nature of the environment. Materials with Co-Cr and Ni-Cr binders containing significant amounts of chromium exhibited the greatest wear resistance (Bayoumi et al., 1983).

In the wood industry, the tool steels frequently employed for cutting operations fall into categories designed for cold work and high-speed applications. These steels are distinguished by their moderate carbon content and the substantial inclusion of alloying elements like Cr, Mo, W, and Mn. The specific composition of these elements plays a crucial role in determining

their hardening characteristics during the heat treatment process (Roberts et al., 1998),(Krauss, 2015)

The resistance to wear of materials is strongly dependent on their chemical composition and microstructure. Alloying elements and their interactions, particularly with carbon, have a decisive effect on mechanical properties and wear durability. In cast iron, the introduction of manganese notably transforms its microstructure, crystallographic characteristics, and robustness (BOUHAMLA, 2009).

Aspects such as the size, shape, distribution, and composition of carbides, as well as the matrix structure, influence abrasion resistance. For example, M7C3 carbides are particularly resistant to abrasive wear. The geometry of tungsten carbides is also essential to their abrasive behavior (Buchely et al., 2005). Furthermore, the wear resistance of steel is enhanced by molybdenum and tungsten carbides, a claim supported by SEM analysis (Brajčinović et al., 2022).

In steel alloys, 1% molybdenum could replace 2% tungsten. M6C-type carbides, which are rich in tungsten (W) and molybdenum (Mo), although harder than Cr7C3 carbides, may see their abrasion resistance decrease depending on their size ((Wang et al., 2006)). Ultimately, particle size is a key factor in a material's wear resistance. Moreover, other alloying elements such as boron, manganese, nickel, chrome, molybdenum, vanadium, and silicon modulate the characteristics of steel. These elements influence properties through their ability to generate carbides, enhance hardenability, and direct austenitic transformation ((Canale et al., 2014)). It is worth noting that chromium, tungsten, and molybdenum are particularly valuable in high-speed steels due to their tendency to form resistant carbides that optimize wear resistance ((Bayer & Becherer, 1989)). The Effect of Certain Alloying Elements in High-Speed Steel are shows in Table 5.

Tableau-A VIII-1 Effect of Certain Alloying Elements in High-Speed Steel
Tiré de Bayer & Becherer (1989)

Alloying Elements	Effect in high-speed steel
Si	<p>The concentration of silicon in high-speed steel shows subtle variations in physical properties up to a limit of about 1.00%. An increase in Si content from 0.15% to 0.45% leads to a moderate increase in maximum post-quench hardness and changes the carbide morphology, although it coincides with a marginal reduction in toughness. Some industrial processes produce grades with Si concentrations up to 0.65%. However, this concentration requires a reduced austenitization temperature to avoid overheating compared to lower concentrations. It is generally observed that Si concentration remains below 0.45% for the majority of grades.</p>
Cr	<p>Chromium is an essential component of high-speed steels, typically present at concentrations ranging from 3% to 5%. It is primarily responsible for the hardenability of the steel. The optimal Cr content is usually set at 4%, a concentration that appears to balance hardness and toughness. Cr also plays a crucial role in minimizing oxidation and decarburization during heat treatments.</p>
W	<p>Tungsten is intrinsic to high-speed steels. The complex carbides formed by iron, tungsten, and carbon impart exceptional hardness to these steels, contributing to their wear resistance. Tungsten enhances high-temperature hardness, induces secondary hardening, and effectively resists tempering. Reduction in W concentration is often compensated for by the addition of molybdenum.</p>
Mo	<p>Molybdenum forms the same double carbide with iron and carbon as tungsten. However, it has half the atomic weight of tungsten, allowing for an approximate weight substitution of 1:2 (Mo:W); that is, one part molybdenum by weight for every two parts of tungsten.</p>

Tableau-A VIII-1 Effect of Certain Alloying Elements in High-Speed Steel (suite)

Alloying Elements	Effect in high-speed steel
Mn	The concentration of manganese in high-speed steels is generally low due to its pronounced effect on increasing brittleness, thus raising the risk of cracking during the quenching phase.

The aim of this study is to assess and compare the wear resistance of three tool steels commonly employed in primary wood processing. This will be achieved by contrasting experimental observations with predictions available in scientific literature. Additionally, the study seeks to identify the most effective steel in terms of wear resistance and resistance to impact for this specific application.

The paper is structured as follows. Section 2 describes the methodology used for conducting wear tests and evaluating mechanical properties. Section 3, presents and analyzes the results of wear volume loss for different steel types, including coated and uncoated variants and the evaluation of Abrasive Wear Mechanical Properties. Section 4, provides a detailed discussion of the key findings, including the role of chemical composition and microstructure in wear resistance. Section 5 summarizes the main findings of the study and their implications.

Materials and Method

In this study aimed at evaluating wear resistance, three distinct tool steels were assessed over a one-week period, totaling 124 hours. These selected steels have unique chemical compositions and exhibit different hardness and wear-resistant properties. The primary goal is to determine their comparative performance to identify the most suitable tool steel for wood cutting applications, aiming at maximizing durability and cutting efficacy in real-life usage conditions.

The first steel is a modified A8 containing 1% tungsten, widely adopted by our industrial partner. The second is a modified A8 variant with 0% tungsten, sourced from Böhler. Lastly, we assessed steel W360, employed by our industrial partner for different applications.

First, the experimental study aims to evaluate the wear of squaring knives using a methodology based on profile measurement and wear volume estimation. The knives are organized in batches of three, based on the steel type and the presence or absence of a coating. Note that the coating is an industrial PVD coating. They are then subjected to scanning before their deployment and after defined operation intervals. It is important to note that the usage duration for all samples is 124 hours. This methodology provides an accurate and fair comparison of knife wear based on the type of steel, whether they are coated or not. The collected data is used to assess the performance of each steel type and to determine their wear resistance in real wood cutting conditions. Wear is quantified by analyzing scans obtained with the high-resolution microscope and by comparing profiles before and after wear.

In the implementation, six batches of clearly identified knives are supplied by our industrial partner and are then scanned:

- Batch #1 (X1) – contains 3 samples of A8 steel modified with 1% tungsten, coated.
- Batch #2 (X2) – contains 3 samples of A8 steel modified with 1% tungsten, uncoated.
- Batch #3 (Y1) – contains 3 samples of A8 steel modified with 0% tungsten, coated.
- Batch #4 (Y2) – contains 3 samples of A8 steel modified with 0% tungsten, uncoated.
- Batch #5 (W1) – contains 3 samples of W360 steel, coated.
- Batch #6 (W2) – contains 3 samples of W360 steel, uncoated.

These samples are mounted on two distinct squaring heads, one for uncoated knives and another for coated ones. Over a period of one week, these knives undergo standard operation conditions, accumulating 124 hours. After this period, scanning with the Keyence microscope is performed. These scans are preserved for future analysis.

In conclusion, comparing the scans before and after use allows for the estimation of wear volume and the determination of the wear profile of the knives.

The edge shrinkage is determined by calculating the volume lost to wear only to abrasive wear region using the formula defined by Equation (1). Equation (2) presents the formula for volume lost, calculated by considering the entire length of the edge.

$$\text{Edge shrinkage volume} = \text{volume lost of edge by abrasive wear (before - After)} \quad (\text{A VIII-1})$$

$$\text{Volume lost} = \text{volume of edge before wear} - \text{volume of edge After wear} \quad (\text{A VIII-2})$$

Secondly, The test method according to ASTM G65 standard defines laboratory protocols to evaluate the resistance of metallic materials against scratch abrasion, using the dry sand test coupled with a rubber wheel (International, 2004).

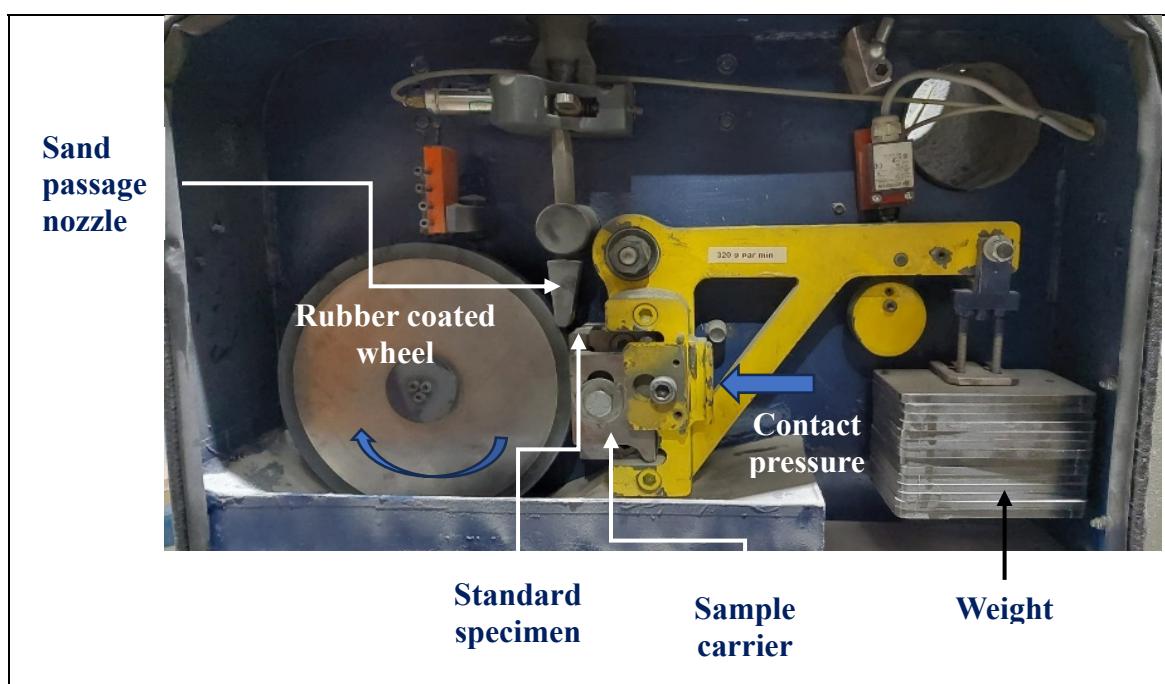


Figure-A VIII-4 Overview of the abrasion test machine available at DK-SPEC

The wear test machine uses a specific abrasive, the rounded quartz grain sand AFS 50/70, with a moisture content of less than 0.5% by weight. Its friction wheel, with a diameter of 228.6 ± 0.25 mm, is made of chlorobutyl rubber molded around an AISI 1020 steel disk, having

a hardness of A 60 \pm 2 (Shore/Asker). The test uses rectangular specimens of 25 x 76 mm with a thickness varying between 3.2 and 12.7 mm. Depending on the procedures adopted, the test duration varies between 30 seconds and 30 minutes, while maintaining a wheel revolution rate of 200 \pm 10 rpm (International, 2004). Table 2 below provides a comparison between the parameters of the dry sand/rubber wheel abrasion test device used by DK-SPEC and the recommendations of the ASTM G65 standard.

Tableau-A VIII-2 Comparison of parameters of the dry sand/rubber wheel abrasion test device

Parameters	ASTM G65 Standard	DK-SPEC Friction Machine
Abrasive	Test sand AFS 50/70	Conforms to standard
Rubber wheel hardness	A 60 \pm 2 (Shore or Asker hardness)	
Wheel diameter	228.6 \pm 0.25 mm	Conforms to standard
Sand flow rate	300 to 400 g/min	320 g/min
Wheel revolution rate	(200 \pm 10 rpm)	200 rpm
Force against specimen	130 N	130 N
Specimen dimensions	25 x 76 mm, thickness 3.2 to 12.7 mm	25 x 76 mm, thickness 3.2 mm

The test parameters are listed in Table 3. Given that the tested samples have resistance ranging from medium to extreme against abrasion, we have chosen to adopt procedure A. It is worth noting that if the volumetric loss exceeds 100 mm 3 , we will switch to procedure B. This latter procedure is a shortened version of procedure A, specially designed for such situations.

Tableau-A VIII-3 Parameters of the dry sand/rubberwheel abrasion test
Tiré de International (2004)

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^B N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion ^A	
			m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

^A See 8.4.
N = Newton (SI metric term for force)
1 lbf = 4.44822 N
1 Kgf = 9.806650 N
^B Force tolerance is $\pm 3\%$.

Results and discussion

Analysis of Tool Steel Characteristics

The chemical composition results for each steel obtained by spectrometry are presented:

Tableau-A VIII-4 Chemical composition of tool steels used

AISI/SAE	C	Cr	Mo	W	V	Si	Mn	Ni	Cu
A8mod+ 0%W	0.516	7.76	1.27	0.0768	0.338	0.832	0.326	0.368	0.121
A8 mod+ 1%W	0.538	7.93	1.17	1.05	0.077	0.786	0.375	0.144	0.0385
W360	0.513	4.43	3.08	0.0296	0.565	0.226	0.221	0.0778	0.0451

The in-depth study of tool steel characteristics proves to be crucial, as it facilitates a holistic understanding of the intrinsic properties of these specific steels. Initially, an exploration of their chemical composition is undertaken, primarily through the application of spectrometry. This technique, known for its accuracy, allows for the precise identification and quantification of constituent elements. Subsequently, a rigorous hardness analysis, frequently used as a

determining criterion for steel quality, will be conducted. In conclusion, our focus will shift to the phase diagram and its associated composition, thereby revealing the steel's microstructure and the intricate interrelationships between its phases. The combination of these distinct studies will provide a comprehensive and detailed overview of tool steel specifics and functionalities. The microstructure of these steels are shows at the Figure.

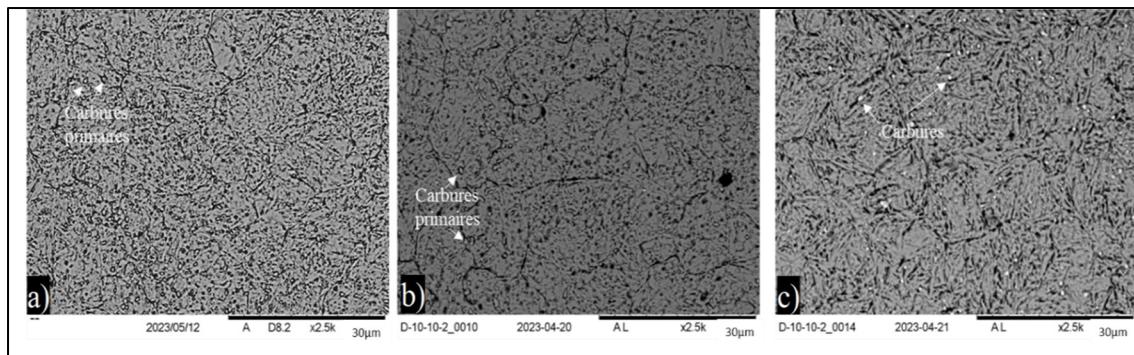


Figure-A VIII-5 Microstructure of steels a) A8 mod +1%W b) A8 mod +0%W c) W360

Tableau-A VIII-5 Summary of the results obtained from the microstructural analysis

Samples	A8mod+0%W	A8mod+1%W	W360
Microstructure	Martensitic	Martensitic	Martensitic
Grain Size	$1.1 \pm 0.4 \mu\text{m}$	$0.9 \pm 0.2 \mu\text{m}$	$0.8 \pm 0.24 \mu\text{m}$
M(C,N) Carbide	V, Nb	Nb	V
M(C,N) Diss. Temp.	1130°C	1205°C	1147°C
M7C3 Carbide	Cr	-	-
M7C3 Diss. Temp.	1060°C	-	-
M6C Carbide	-	W	Mo
M6C Diss. Temp.	-	981°C	1032°C
M23C6 Carbide	Cr, Fe	Cr, Fe	Cr, Fe
M23C6 Diss. Temp.	1010°C	1044°C	916°C

A HRC hardness test was conducted on materials using a diamond indenter. The measurement is based on the penetration depth difference under two loads: 10 kgf followed by 150 kgf. The HRC scale, designed for hard materials, serves as a reference for this test (Testing, 2019). The Figure shows the results obtains.

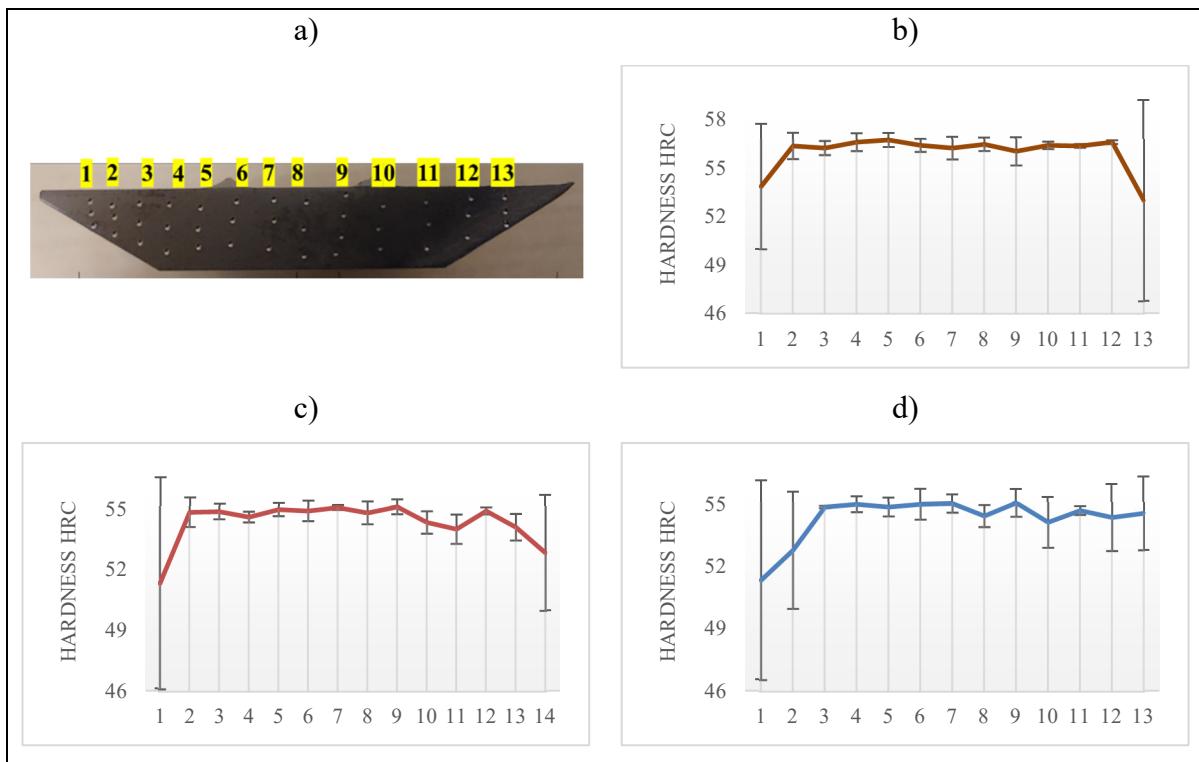


Figure-A VIII-6 Rockwell Hardness a) Diamond cone indentation mark
b) A8 mod+0%W, c) A8 mod+1%W, d) W360

After synthesizing the measurements taken during the hardness test, the values obtained for each type of steel are show.

Tableau-A VIII-6 Rockwell Hardness results

Steel	A8mod+0%W	A8mod+1%W	W360
Rockwell Hardness (HRC)	55.91 ± 1.14	54.33 ± 1.05	54.29 ± 1.07

These results allow us to gauge the relative hardness of these alloys, highlighting the nuances based on their different compositions.

Wear and Damage Mechanisms of Tool Steels

The Figure displays the knives obtained after 124 hours of operation. Visual observations revealed notable material detachments on certain coated knives due to the wood's condition, suggesting potential vulnerability of these samples. This implies that the coated modified A8 with 1% tungsten may have wear resistance limitations, especially when subjected to challenging machining conditions. On the other hand, focusing solely on the abrasive wear section of the knives, it's evident that coated steel variants exhibit reduced wear compared to the uncoated versions. These findings indicate that coatings can enhance wear resistance and extend knife longevity under abrasive conditions. Cumulatively, while the coated modified A8 with 1% tungsten may have inherent fragility under challenging machining scenarios, the coating provides added abrasion wear protection. Consequently, it may offer a balanced trade-off between shock resistance and wear durability, contingent upon specific application requirements. Comprehensive studies might be required to delve deeper into wear and fragility mechanisms associated with these coated modified A8 knives with 1% tungsten.

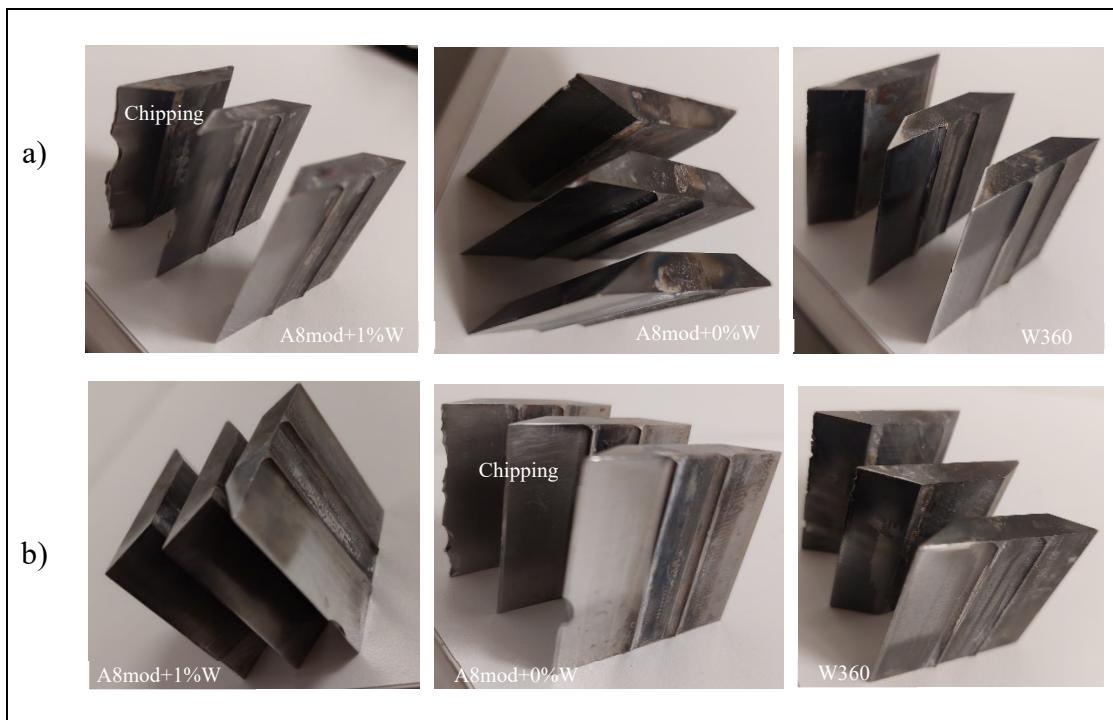


Figure-A VIII-7 Worn knives a) coated and b) Uncoated

Typical SEM (Scanning Electron Microscopy) micrographs are showcased below, offering a detailed visualization of the tool's surface characteristics.

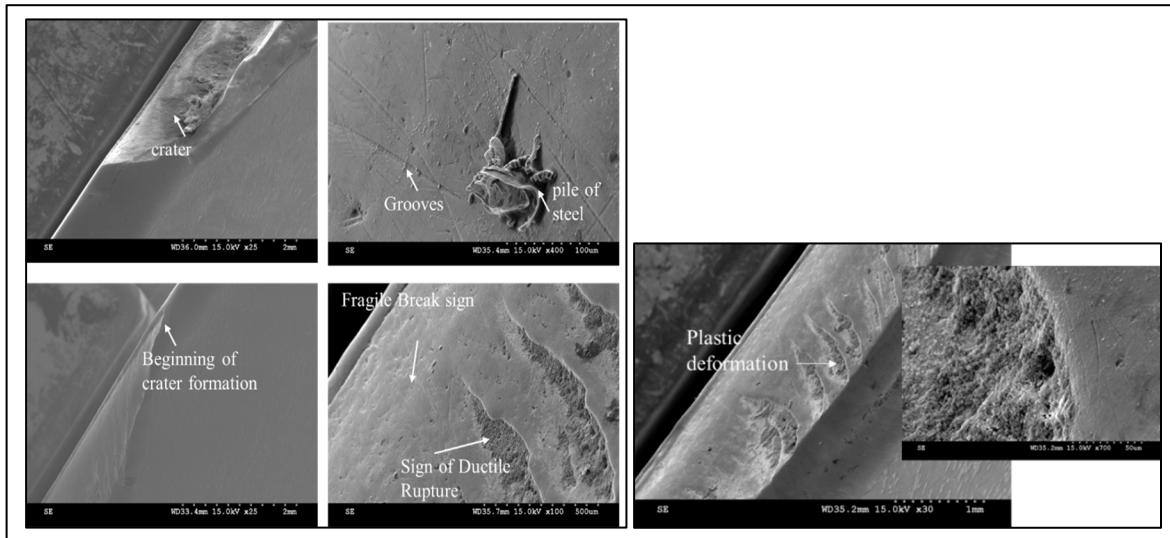


Figure-A VIII-8 Wear damage of A8 mod + 1%W steel

It's noteworthy to observe that there are no cracks surrounding the wear area. Instead, there are both ductile and brittle deformations present. This suggests a complex interplay of mechanical responses in the material under the conditions it was subjected to. Similar observations are noted for the A8 mod + 0%W steel; however, cracks are observed near the chipping. The Figure shows typical SEM micrographs.

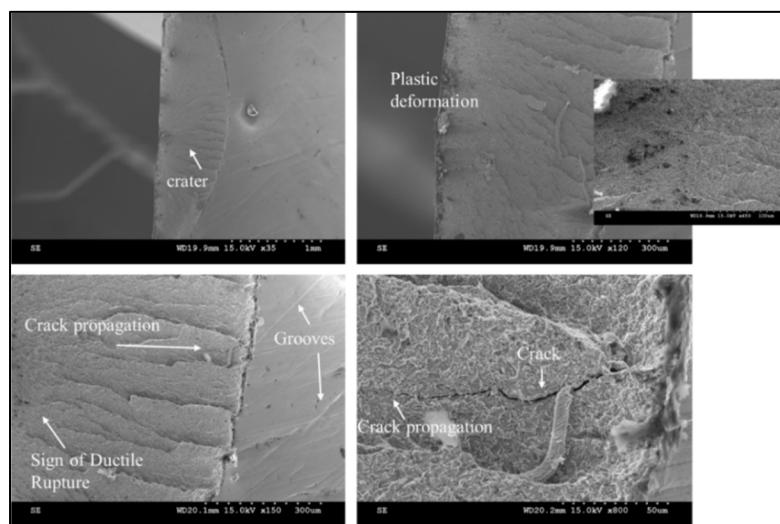


Figure-A VIII-9 Wear damage of A8 mod + 0%W steel

On the other hand, the W360 steel does not display any evident degradation, except for some edge recession. This is especially noteworthy since all three steels were subjected to the same number of working hours. This highlights the superior shock resistance of the W360 steel compared to the other two steels. The Figure shows typical SEM micrographs.

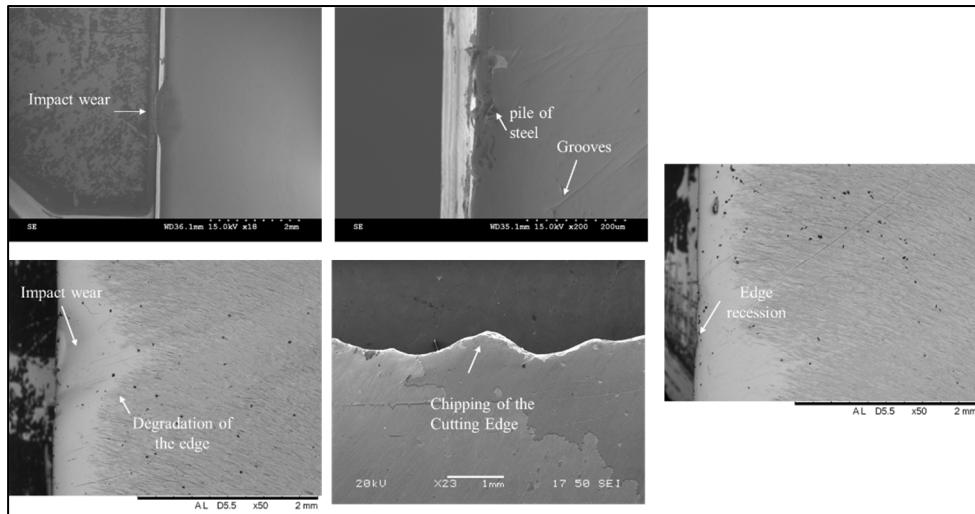


Figure-A VIII-10 Wear damage of W360 steel

Based on the wear results (micrographic images), it's noteworthy that the W360 steel does not necessarily align with conventional trends observed in literature regarding tool steel properties. Contrary to certain expectations, it displays exceptional wear resistance, surpassing the other two steels in the experiment, despite its unique chemical composition. Indeed, literature typically suggests that high-chromium tool steels are known for their superior abrasion resistance, those containing tungsten and tungsten carbide are known for their abrasive wear resistance, high-nickel, manganese, and silicon steels are reputed for their fatigue resistance, and high-tungsten and molybdenum steels are commonly used for erosion resistance. However, the exceptional wear resistance of the W360 steel, despite its atypical chemical composition compared to these stereotypes, underscores the complexity of wear resistance in tool steels in the wood industry.

We conducted a comprehensive study of wear-related failures in tool steels, highlighting two crucial aspects that shape their durability and performance: the effect of chemical composition on wear phenomena and the impact of coatings applied to these steels. Table 7 summarizes the wear mechanisms observed in each case, thus providing a better understanding of how these factors interact and influence the wear resistance of these materials.

Tableau-A VIII-7 Wear mechanisms observed in each case of steel

Failure	Uncoated Steels			Coated Steels		
	A8mod +1%W	A8mod +0%W	W360	A8mod +1%W	A8mod +0%W	W360
Abrasive wear						
Diminution of the edge's sharpness	x	x	x	x	x	x
Grooves	x	x	x	x	x	x
Edge degradation	x	x	x	x	x	x
Adhesive wear						
Craters		x		x		
Material tearing		x		x		
Impact wear						
Edge chipping	x	x	x	x	x	x
Micro-cracks		x		x		
Plastic deformation		x		x		

It is noteworthy that among the wear mechanisms observed for the three steel types studied, abrasive wear and impact wear are the most predominant. These observations suggest that under the envisaged application conditions, these wear mechanisms play a pivotal role in determining the durability and performance of tool steels. Moreover, the W360 steel exhibits a markedly superior wear resistance compared to the other two steel types, which could be attributed to its distinct chemical composition and intrinsic material properties.

Quantification of Wear Volume Loss

The wear assessment of the modified A8 steel with 0% tungsten offered several key insights. Visual examinations of certain uncoated knives revealed material detachments due to the wood condition, suggesting their vulnerability. This indicates potential wear resistance limitations for the uncoated modified A8 variant with 0% tungsten, especially when faced with challenging machining materials. Figure show the results obtain after measurement of volume loss.

Interestingly, when focusing on the abrasive wear, uncoated steels displayed less wear than their coated counterparts. These observations suggest that while uncoated modified A8 knives with 0% tungsten might exhibit fragility and susceptibility to material detachment under strenuous machining conditions, they can provide relative abrasive wear resistance. In applications where wear resistance is paramount, uncoated knives might be favored over coated ones.

The wear evaluation for the W360 steel knives highlighted minor material detachments, indicating some samples' fragility. Yet, when assessing the abrasive wear region or the entire worn edge, it's evident that coated W360 knives display reduced wear compared to uncoated ones. This suggests the applied coating enhances the steel's wear resistance under abrasive conditions. In summary, while some W360 steel knives might exhibit minor material detachments, a coating significantly boosts their wear resistance. Thus, coated W360 knives ensure enhanced durability and superior performance under abrasive machining conditions.

Tableau-A VIII-8 Volume loss of steels

	Steel	Number of specimens	Wear loss volume (mm ³)	Edge shrinkage volume (mm ³)
Coated Steels	A8 mod +1%W	3	44.54 ± 21.18	2.26 ± 1.72
	A8 mod +0%W	3	15.09 ± 1.71	2.24 ± 0.83
	W360	3	15.48 ± 2.96	1.68 ± 1.14
Uncoated Steels	A8 mod +1%W	3	21.28 ± 6.77	3.49 ± 0.49
	A8 mod +0%W	3	34.99 ± 19.7	2.99 ± 1.4
	W360	3	18.66 ± 5.29	3.01 ± 1.69

Visual inspection of the knives revealed significant material detachments on coated knives made from modified A8 steel with 1% tungsten, indicating their fragility compared to uncoated variants. Conversely, uncoated knives made from modified A8 steel with 0% tungsten also displayed material detachments, albeit less pronounced. Knives made from W360 steel, regardless of their coating, showcased minor material detachments, suggesting superior wear resistance compared to modified A8 variants.

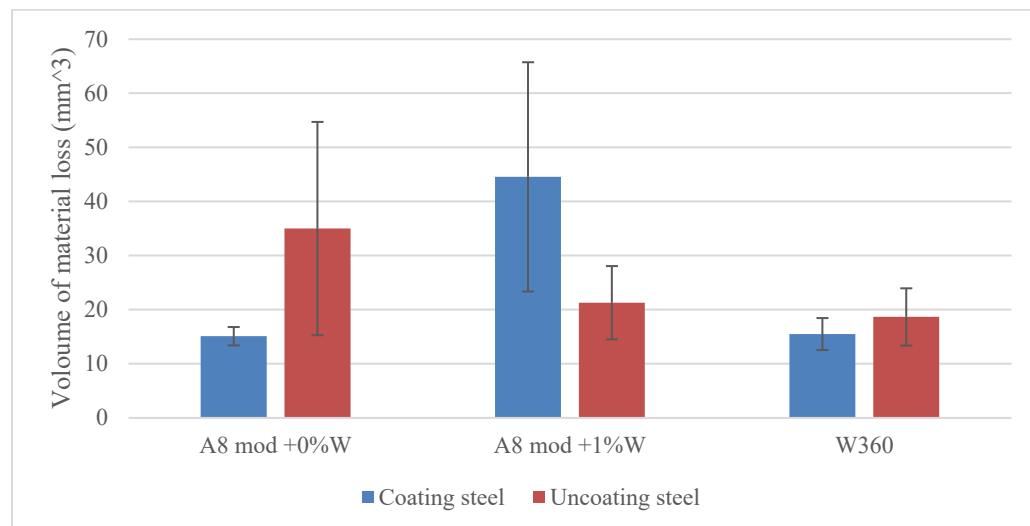


Figure-A VIII-11 Histogram of volumes material lost by wear according to the type of steel

However, when focusing on the part worn by abrasion, a different trend emerges. Knives coated in W360 steel, A8 mod + 1%W, and A8 mod + 0%W show less wear than their uncoated counterparts. These results suggest that applying a coating improves the wear resistance of steel knives. Thus, knives coated in W360 steel offer the best wear resistance. These observations highlight the importance of the coating in the performance and durability of steel knives.

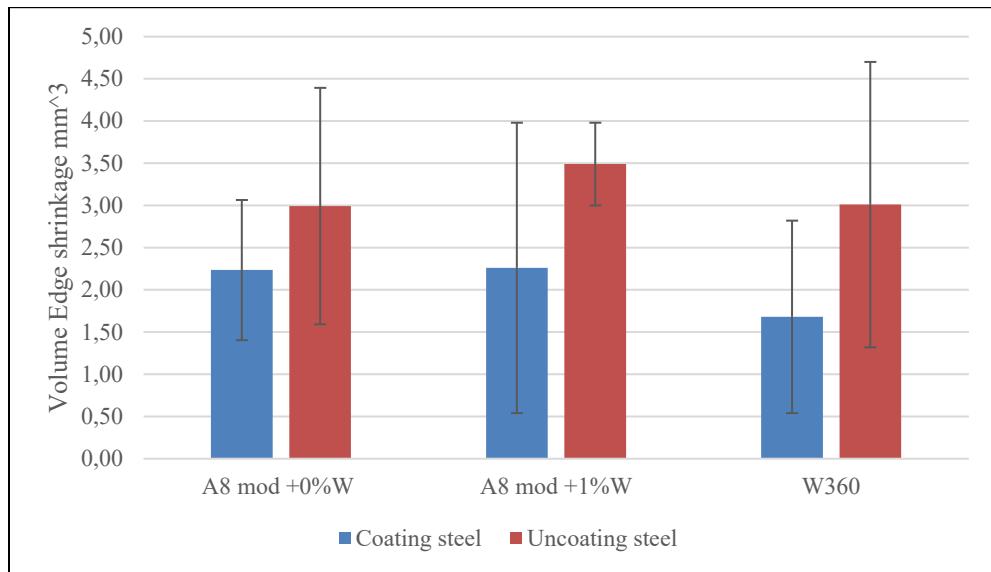


Figure-A VIII-12 Histogram of Edge shrinkage volume according to the type of steel

In conclusion, visual observation and the measurement of material loss highlight differences in material chipping among the different tested steels. However, the analysis of wear by abrasion indicates that coated knives exhibit better wear resistance than uncoated knives, regardless of the steel composition. Further studies are imperative to understand the exact mechanisms influencing these outcomes and verify coatings' efficacy in bolstering knife wear resistance. Nonetheless, deeper analyses and additional mechanical tests might be requisite to affirm these findings and fathom the specific wear mechanisms inherent to each steel type. It remains paramount to continually probe the interplay between steel's chemical composition, coatings, and usage conditions to optimize industrial knives' wear resistance.

Evaluation of abrasive wear mechanical properties

To assess the mechanical properties of the various steels, wear tests were conducted. The primary goal of these tests is to determine the optimal conditions for each base material, aiming to strike an abrasive wear resistance. We employed Procedure A from the standard protocol of the dry sand/rubber wheel abrasion test. The abrasive wear progression was tracked based on cycle count, where 1,000 cycles corresponded to a 5-minute duration, culminating in 6,000 cycles. The obtained results are depicted in following figures, which also displays the wear track progression for both coated and uncoated steels.

Following Procedure A, of the ASTM G65 standard, we obtained wear test results for the A8 modified steel with 0% tungsten (W). Figure 13-a illustrates the wear track observed every 1,000 cycles of the wheel. Meanwhile, Figure 13-b displays the progression of mass loss as a function of the wheel's cycle count.

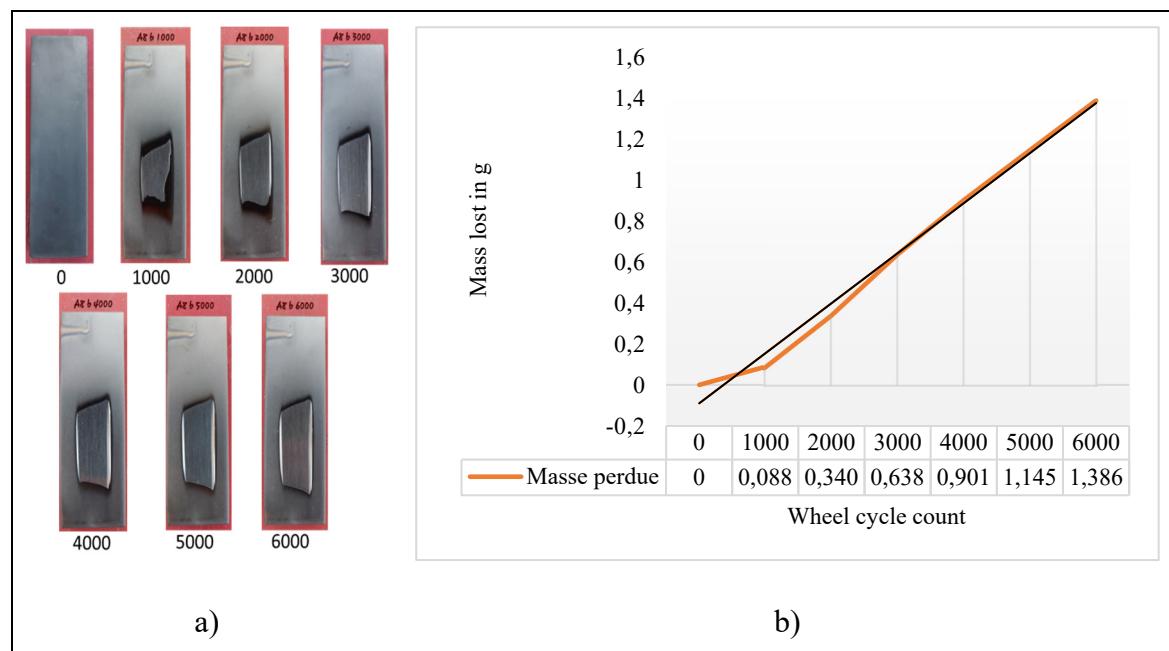


Figure-A VIII-13 Coated A8 mod+0%W steel: a) Progression of the wear track and b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

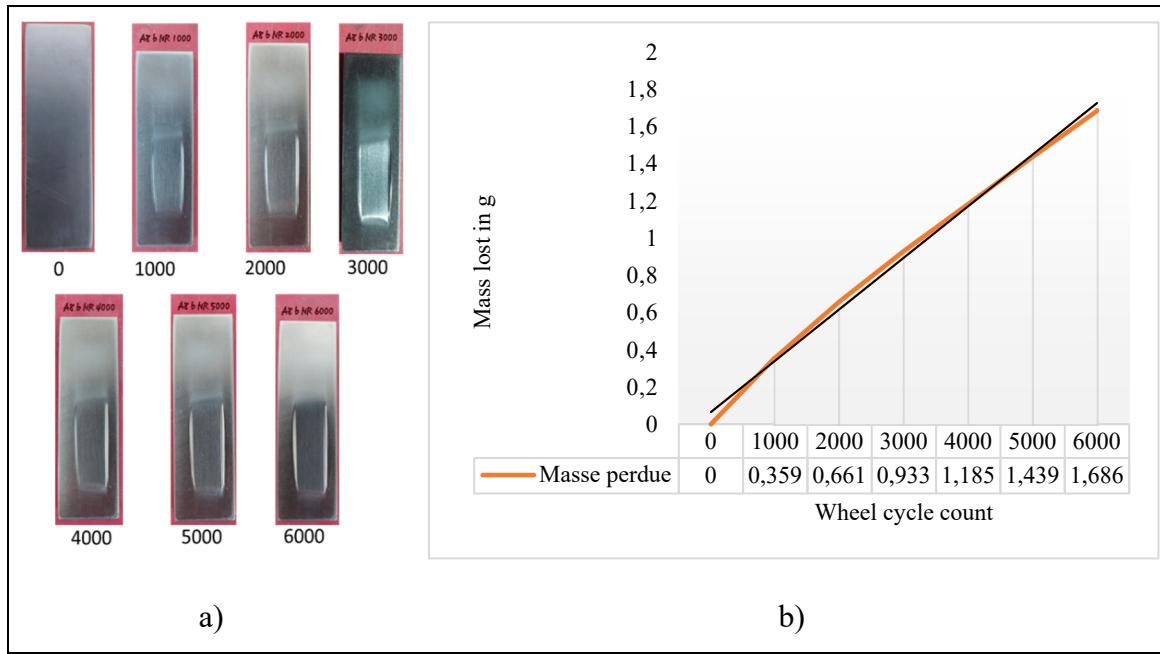


Figure-A VIII-14 Uncoated A8 mod+0%W steel: a) Progression of the wear track and
b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

Upon examining the wear progression, there is a consistent mass loss observed for both the coated and uncoated steel. However, a close observation of the first 2,000 cycles for the coated steel is crucial. Indeed, it reveals a lower mass loss during this initial phase, before adopting a linear trend from the 2,000 cycles onward. The similar results for A8 mod +1%W are depicted in the subsequent Figure 15 and figure 16. Upon examining the wear progression, we observe the same pattern as seen with the A8mod+0%W steel. There's a consistent mass loss for both the coated and uncoated steel. However, a close inspection of the initial 2,000 cycles for the coated steel reveals a lower mass loss, which then seems to align with the linear trend observed from the 2,000 wheel cycles onward.

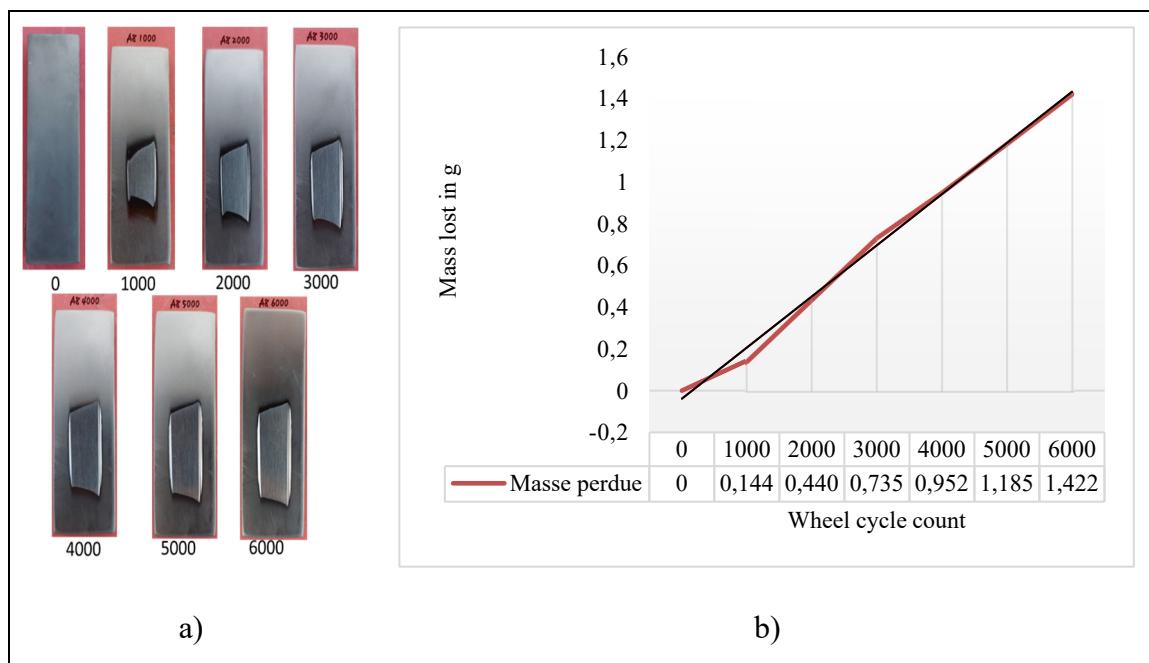


Figure-A VIII-15 Coated A8 mod+1%W steel: a) Progression of the wear track and b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

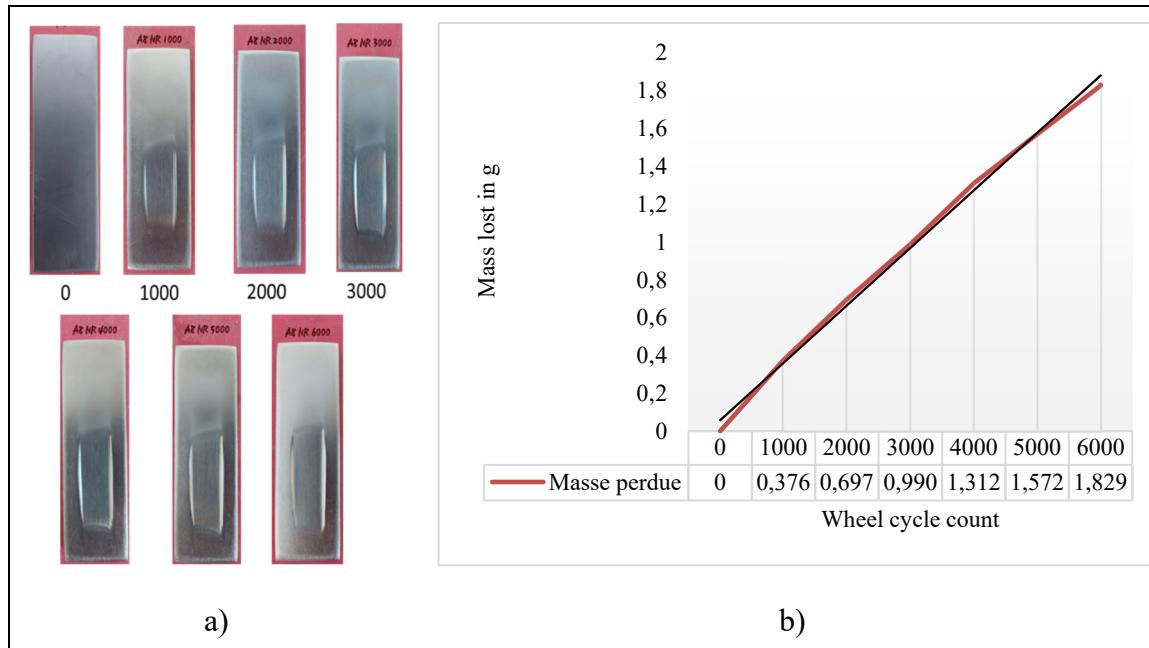


Figure-A VIII-16 Uncoated A8 mod+1%W steel: a) Progression of the wear track and b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

For the W360 steel, upon analyzing the wear progression, a consistent mass loss is observed for both steel types, whether coated or not. However, a distinct characteristic stands out for the

coated steel during the initial 2,000 cycles, compared to the other steels. Indeed, for both the coated and uncoated steel, the mass loss trend is linear and uniform throughout the entire 6,000 wheel cycle period.

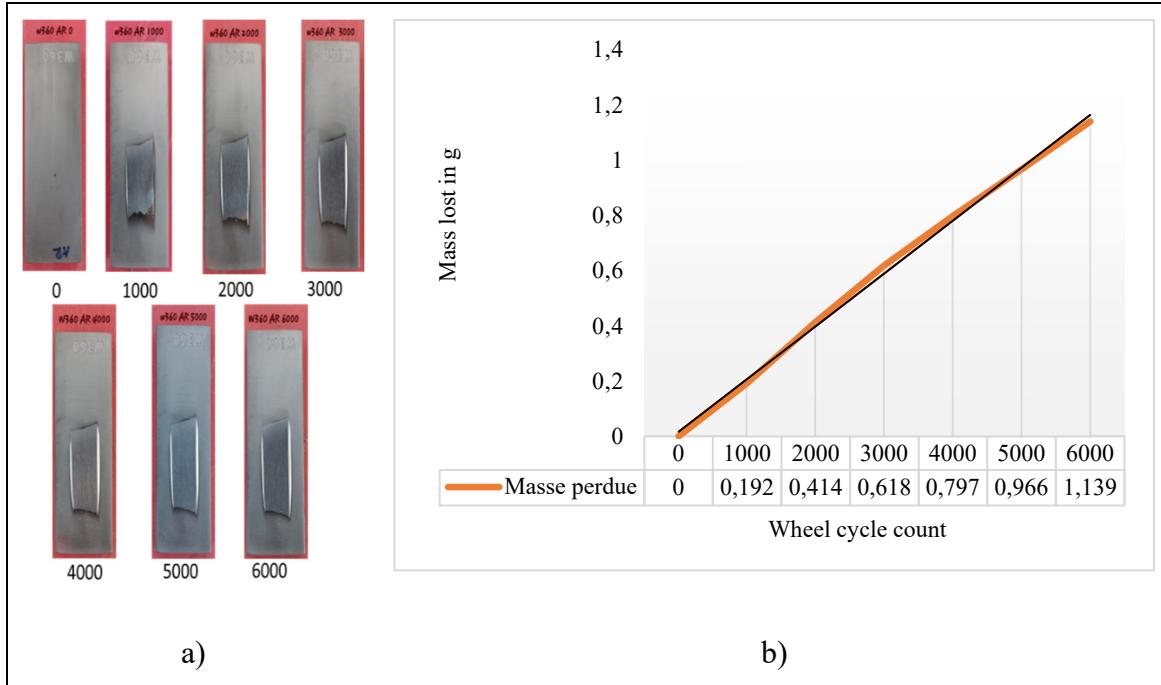


Figure-A VIII-17 Coated W360 steel: a) Progression of the wear track and
b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

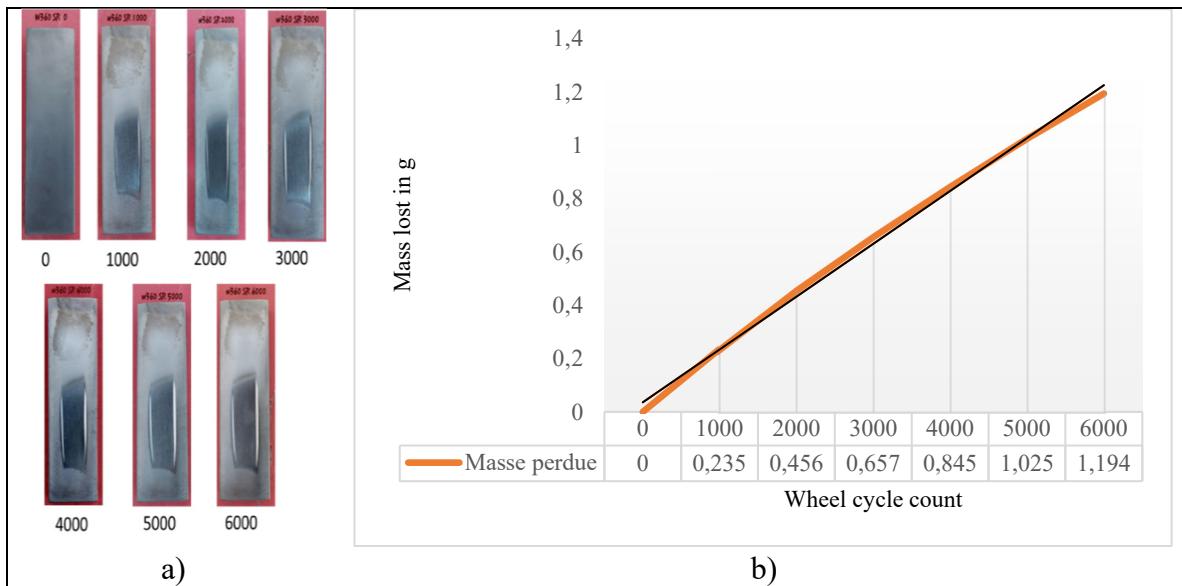


Figure-A VIII-18 Uncoated W360 steel: a) Progression of the wear track and
b) Progression of the lost mass, as a function of the rubber wheel's cycle count

The volumes obtained for each condition were calculated using the following Equation (3):

$$Lost\ Volume(mm^3) = \frac{Lost\ Mass\ (g)}{Material\ Density\ (g/cm^3)} \times 1000 \quad (A\ VIII-3)$$

Tableau-A VIII-9 Volumes loss obtained for each condition

Steel Type	Mass Lost After 6,000 Cycles (g)	Material Density (g/cm ³)	Lost Volume (mm ³)
Coated A8 mod+ 0% W	1.386	7.7	180
Uncoated A8 mod+ 0% W	1.686	7.7	219
Coated A8 mod+ 1% W	1.422	7.8	182
Uncoated A8 mod+ 1% W	1.829	7.8	234
Coated W360	1.139	7.6	150
Uncoated W360	1.194	7.6	157

Given that the calculated lost volume exceeds 100 mm³, according to the ASTM G65 standard, we need to switch to Procedure B. This is a short-term variant of Procedure A, equating to 2,000-wheel revolutions. The results are presented in the Table and graphically in Figure.

Tableau-A VIII-10 Results of wear test

Sample	Number of Specimens	Mass Lost (g)	Mass Lost (mg)	Wear Rate (mg/m)
Coated W360 Steel	3	0.381 ± 0.01	381 ± 12.5	0.27
Uncoated W360 Steel	3	0.436 ± 0.02	436 ± 16.37	0.30
Coated A8 mod +1%W	3	0.339 ± 0.03	339.67 ± 26.63	0.24
Uncoated A8 mod +1%W	3	0.675 ± 0.01	675 ± 11.53	0.47
Coated A8 mod +0%W	3	0.381 ± 0.03	380.67 ± 32.13	0.27
Uncoated A8 mod +0%W	3	0.636 ± 0.007	636.33 ± 6.81	0.44

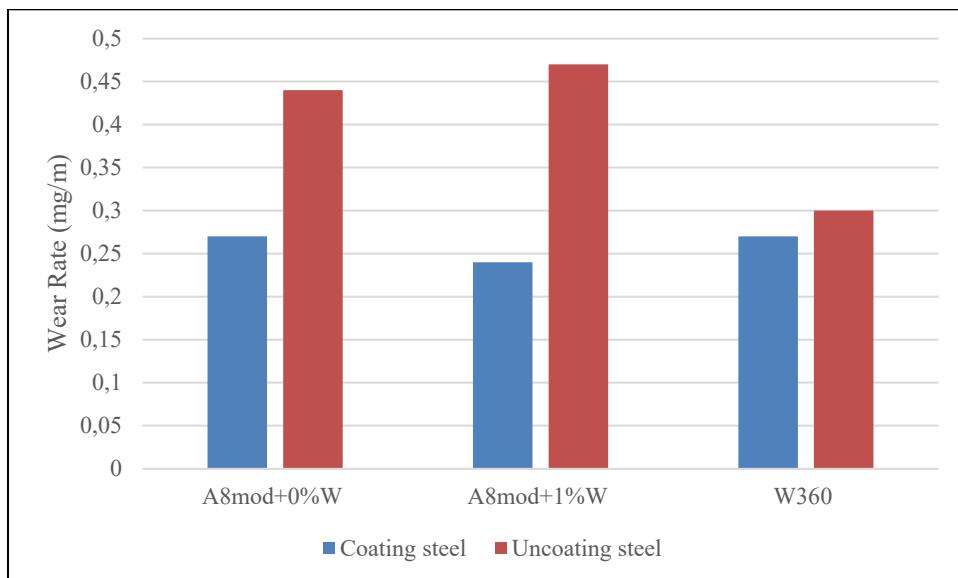


Figure-A VIII-19 Wear rate of steels

Discussion of results

Within the purview of investigating wear mechanisms in tool steels, an in-depth analysis of the steels' intrinsic characteristics, chemical composition, hardness tests, and microstructural examinations has yielded insightful revelations. Despite their close hardness levels, the three steels displayed considerable disparities in chemical composition and wear resistance. W360 steel, albeit having lower chromium content but higher molybdenum and vanadium concentrations, exhibited superior wear and impact resistance. This challenges conventional beliefs that emphasize chromium content for abrasion resistance (Bayer & Becherer, 1989).

Microstructural observations underscored the significance of grain size and carbide nature in determining the steels' mechanical properties (Brajčinović et al., 2022), (Wang et al., 2006). Coatings were demonstrably efficacious in attenuating wear; however, the pronounced wear on the coated A8 mod+1%W steel necessitates scrutiny into the steel-coating compatibility. These insights hold profound implications for the timber industry, guiding steel and coating selection to optimize tool lifespan and performance. They also underscore that wear resistance is multifaceted, influenced by chemical composition, microstructure, and coating interactions.

Comparative assessments of the three tool steels exposed pronounced discrepancies in wear resistance. The modified A8 steel with 1% tungsten, despite evidencing material tearing suggestive of fragility, manifested diminished abrasive wear when coated. This accentuates the coating's efficacy in bolstering wear resistance. Modified A8 steel with 0% tungsten also manifested wear resistance limitations, particularly when uncoated. Findings suggest that coatings can provide substantial protection against abrasive wear, even for potentially fragile steels. W360 steel, irrespective of its coating status, exhibited superior wear resistance compared to the modified A8 steels. For coated blades, minimal material tearing, and diminished abrasive wear were observed, suggesting that coated W360 steel could potentially provide optimal durability and performance under abrasive machining conditions.

Uncoated knives generally exhibit a higher wear rate, although non-uniform variations are observed, likely due to differences in machining conditions and the presence of impurities in the wood, such as sand particles (Heidari, 2019). Furthermore, coatings appear to provide protection against abrasive wear, suggesting their utility in extending the tool lifespan in abrasive environments (Aramcharoen et al., 2008). However, the presence of material tearing on some coated knives suggests potential fragility in challenging machining conditions.

Reviewing the overall results of Procedure B of the wear test according to ASTM standard to assess the performance of the steels in terms of resistance to abrasive wear, salient observations concerning wear resistance of the tested steels, both coated and uncoated, are as follows:

- A8mod+0%W steel exhibited a marked enhancement in wear resistance upon coating application, registering a 39% wear reduction.
- A8mod+1%W steel also benefited from the coating, showcasing a notable 49% wear reduction.
- Conversely, for W360 steel, the coating appeared less effective, yielding a marginal wear reduction of approximately 10%.

Referring to Table 15, it's evident that uncoated W360 steel exhibits the lowest wear rate among the uncoated steels, recording a rate of 0.3 mg/m.

It is pertinent to mention that abrasion wear tests prove to be crucial informative tools for assessing the potential of coatings in specific cutting conditions (Knotek et al., 1994). These evaluations highlight the significant contribution of coatings in enhancing abrasive wear resistance in tool steels (Grenier, 1998). Data derived from these wear tests can provide a comprehensive understanding of coating performance, thereby revealing their effectiveness in prolonging the longevity of steel tools in the face of abrasive wear challenges.

When considering the entire cutting edge, the measured volume reflects not only regular wear but also additional volume loss attributable to chipping. However, when focusing solely on regular wear, the trend seems to align with the results of the wear tests according to the ASTM

G65 standard. In these tests, coated steels demonstrated a lower wear rate as well as less volume loss. These observations could indicate a direct correlation between the wear rate and volume loss, thereby suggesting better durability for coated steels. Chipping could also play a significant role in volume loss, as evidenced by the micrographic images and the quantitative results of this material loss.

In summation, this study furnishes a comprehensive examination of tool steel wear during wood machining. Findings underscore the pivotal role of coatings in enhancing knife wear resistance, even under challenging machining conditions and with potentially fragile steels. This reiterates the significance of judicious steel selection and appropriate coating application to optimize tool longevity and the quality of the end product.

Conclusion

In the vast realm of the timber industry, the durability and performance of tool steels remain paramount. This comprehensive study undertook a meticulous examination of the wear resistance of various tool steels used in wood cutting, shedding light on their distinct microstructural differences, hardness levels, and wear patterns. It became evident that the chemical composition and microstructural attributes of these steels play a defining role in determining their wear resistance and overall performance. While the modified A8 steels displayed susceptibility to wear, especially when uncoated, the W360 steel, with its unique composition, demonstrated superior wear resistance.

Furthermore, the research underscored the transformative impact of coatings. When applied judiciously, coatings can significantly enhance wear resistance, even in steels that might inherently be more susceptible to wear. This finding is particularly pertinent for industries seeking to optimize tool lifespan and performance under abrasive conditions. However, the research also calls for a deeper exploration into the compatibility between specific steels and coatings, suggesting that a one-size-fits-all approach may not always be effective.

In summary, this research not only offers invaluable insights for the timber industry but also charts a path forward for future studies. By understanding the intricate interplay between steel composition, microstructure, and coatings, industries can make more informed decisions, optimizing tool performance and durability. The findings serve as a foundation, beckoning further exploration into wear mechanisms, coating technologies, and the nuanced intricacies of tool steel performance.

Reference

- ABDELALI, H. B., SALEM, W. B., RECH, J., DOGUI, A., & KAPSA, P. (s.d.). Corrélation des mécanismes d'usure en frottement et en usinage de l'acier AISI 1045.
- Achour, A. (2006). Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement.
- Affatato, S., & Brando, D. (2013). Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants. Dans *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints* (pp. 3-26). (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096128.1.3>
- Aghababaei, R., Warner, D. H., & Molinari, J.-F. (2016). Critical length scale controls adhesive wear mechanisms. *Nature communications*, 7(1), 11816.
- Aknouche, H., Outahyon, A., Nouveau, C., Marchal, R., Zerizer, A., & Butaud, J.-C. (2009). Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood. *Journal of materials processing technology*, 209(6), 2918-2922.
- Ameur, T., Assas, M., & Mazouz, H. (2007). Optimisation des paramètres de coupe en utilisant l'algorithme à essaim de particules. *Matériaux & techniques*, 95(6), 371-380.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P. T., Yang, S., Cooke, K. E., & Teer, D. G. (2008). Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(14), 1578-1584. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>
- Astakhov, V. P. (2004). The assessment of cutting tool wear. *International journal of machine tools and manufacture*, 44(6), 637-647.
- ATIBT, A. T. I. D. B. T. (2016). LES NIVEAUX DE TRANSFORMATION DU BOIS. Repéré à <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/04/Les-niveaux-de-transformation-du-bois-2017-ATIBT-FR-ENG.pdf>
- Barrow, G. (1972). Wear of cutting tools. *Tribology*, 5(1), 22-30.

- Bayer, A. M., & Becherer, B. A. (1989). High-Speed Tool Steels. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 51-59). (S.1.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002121>
- Bayoumi, A.-M., Bailey, J. A., & Stewart, J. S. (1983). Comparison of the wear resistance of various grades of cemented carbides that may find application in wood machining. *Wear*, 89(2), 185-200.
- Bencheikh, I. (2018). *Simulation multi-étapes de l'usure des outils de coupe revêtus par une modélisation XFEM/Level-set*. Université de Lorraine.
- Black, J. T. (1989). Mechanics of Chip Formation. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 7-12). (S.1.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002117>
- BÖHLER K329. (2023). Repéré à <https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/k329/>
- BÖHLER W360 ISOBLOC. (2023). Repéré à <https://www.bohler.fr/fr/products/w360isobloc/>
- BOUHAMLA, K. (2009). *Étude de l'influence de la composition chimique sur la formation de la structure et la tenue à l'usure des fontes au chrome*. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Bourbonnais, R. (2003). *Econométrie* (Vol. 4). (S.1.) : Dunod.
- Bourithis, L., & Papadimitriou, G. D. (2009). The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique. *Wear*, 266(11-12), 1155-1164.
- BOUZID, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13*.
- Brajčinović, S., Begić Hadžipašić, A., & Medved, J. (2022). Inhibitory Effect of Commercial Inhibitor VCI 379/611 on the Corrosion Behaviour of HTCS-130 Tool Steel for Hot Work. *Metals*, 12(6), 966. <https://doi.org/10.3390/met12060966>
- Brink, T., & Molinari, J.-F. (2019). Adhesive wear mechanisms in the presence of weak interfaces: Insights from an amorphous model system. *Physical Review Materials*, 3(5), 053604.
- Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., León, L. M., & Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259(1-6), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>

- Canale, L. C. F., Albano, L., Totten, G. E., & Meekisho, L. (2014). Hardenability of Steel. Dans *Comprehensive Materials Processing* (pp. 39-97). (S.1) : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01219-X>
- Cayer-Barrioz, J. (2003). *Mécanismes d'usure de polymères orientés: Application à l'abrasion des fibres de polyamide*. Ecully, Ecole centrale de Lyon.
- Čerče, L., Pušavec, F., & Kopač, J. (2015). 3D cutting tool-wear monitoring in the process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 3885-3895.
- Chafik Labidi. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech. Repéré à {NNT : 2006ENAM0058}. {pastel-00002491}
- Czibula, C., Seidlhofer, T., Ganser, C., Hirn, U., & Teichert, C. (2021). Longitudinal and transverse low frequency viscoelastic characterization of wood pulp fibers at different relative humidity. *Materialia*, 16, 101094.
- da Silva, L. J., Scheuer, C. J., & D'Oliveira, A. S. C. (2019). Effect of microstructure on wear performance of NiCrSiBC coatings. *Wear*, 428, 387-394.
- Dawson, T. G., & Kurfess, T. R. (2005). Quantification of tool wear using white light interferometry and three-dimensional computational metrology. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5), 591-596.
- Dearnley, P. A., & Aldrich-Smith, G. (2004). Corrosion-wear mechanisms of hard coated austenitic 316L stainless steels. *Wear*, 256(5), 491-499.
- DJAFRI, M. (2015). *Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant-application aux freins à disques*. University of sciences and technology in Oran.
- DK-SPEC portfolio outils de coupe. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/outils-coupe-industriels.html>
- DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseuses. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/tetes-equarisseuses.html>
- Dolinšek, S., Šuštaršič, B., & Kopač, J. (2001). Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. *Wear*, 250(1-12), 349-356.
- Eyre, T. S. (1981). Wear mechanisms. *Powder Metallurgy*, 24(2), 57-63.
- Faga, M. G., & Settineri, L. (2006). Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3002-3007. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.013>

- Feng, K., Smith, W. A., Borghesani, P., Randall, R. B., & Peng, Z. (2021). Use of cyclostationary properties of vibration signals to identify gear wear mechanisms and track wear evolution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107258.
- Ghosh, S. C., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Effect of knife wear on surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter. *Wood and Fiber Science*, 47(4), 355-364.
- Ghosh, Shyamal C., Heidari, M., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Patterns of knife edge recession in an industrial chipper-canter. *Forest Products Journal*, 65(7-8), 358-364.
- Grenier, M. (1998). *Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane*. (S.l.) : Université Laval.
- He, F. J., Fang, Y. Z., & Jin, S. J. (2014). The study of corrosion-wear mechanism of Ni-W-P alloy. *Wear*, 311(1-2), 14-20.
- Heidari, M. (2019). *Improvement of cutting tool life for the primary transformation of wood*. Thèse de Doctorat. Université Laval, Québec, Canada. Repéré à <http://hdl.handle.net/20.500.11794/35717>
- Hernandez, R. E., & Lessard, J. (1997). Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter. *Forest products journal*, 47(3), 89.
- Hernandez, R. E., & Quirion, B. (1993). Effect of a chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce. *Forest Products Journal*, 43(9), 8.
- Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement: durabilité de la récolte de bois d'œuvre*. (2022). Gatineau QC : Environnement et changement climatique Canada = Environment and Climate Change Canada.
- International, A. (2004). *ASTM G65-04 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. (S.l.) : ASTM International West Conshohocken.
- Ionescu, C. C. (2012). *Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr*. Ecole Centrale Paris.
- Jakub, S., Bartosz, P., & Grzegorz, K. (2011). Measurement of the Cutting Tool Edge Recession with Optical Methods. Dans *Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar, Skellefteå, Sweden*, 11p.
- Jurkovic, J., Korosec, M., & Kopac, J. (2005). New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1023-1030.

- Kant, G., & Sangwan, K. S. (2014). Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. *Journal of cleaner production*, 83, 151-164.
- Kato, K. (2005). Classification of wear mechanisms/models. *Wear–materials, mechanisms and practice*, 9-20.
- Kato, Koji, & Adachi, K. (2000). Wear mechanisms. Dans *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology* (pp. 273-300). (S.1.) : CRC press.
- Kendall, L. A. (1989). Tool Wear and Tool Life. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 37-48). (S.1.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002120>
- Kharrat, M., Baccar, M., & Dammak, F. (Éds). (2020). *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics: selected contributions from the 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM 2019, December 16-18, 2019, Hammamet, Tunisia*. Communication présentée au International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, Cham : Springer.
- Klamecki, B. E. (1979). A review of wood cutting tool wear literature. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 37(7), 265-276. <https://doi.org/10.1007/BF02607429>
- Knotek, O., Lugscheider, E., Löffler, F., Krämer, G., & Zimmermann, H. (1994). Abrasive wear resistance and cutting performance of complex PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 68-69, 489-493. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90206-2](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90206-2)
- Komotori, J., Hisamori, N., & Ohmori, Y. (2007). The corrosion/wear mechanisms of Ti–6Al–4V alloy for different scratching rates. *Wear*, 263(1-6), 412-418.
- Kovaříková, I., Szewczyková, B., Blaškoviš, P., Hodúlová, E., & Lechovič, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.
- Kowaluk, G., Szymanski, W., Palubicki, B., & Beer, P. (2009). Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(2), 173-176.
- Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. (S.1.) : Asm International.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. *Environments*, 5, 34.
- Labidi, C., Collet, R., Nouveau, C., Beer, P., Nicosia, S., & Djouadi, M. A. (2005). Surface treatments of tools used in industrial wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 200(1), 118-122. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.098>

- Labidi, Chafik. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Arts et Métiers ParisTech.
- Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F., & Man, H. C. (2000). Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 203-207. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00410-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00410-0)
- Lee, J.-H., Myagmar, G., Kwon, H.-B., & Han, J.-S. (2022). A digital method for wear volume loss analysis using a single-scan three-dimensional dataset. *Journal of Dental Sciences*, 17(1), 638-641.
- Mair, L. H., Stolarski, T. A., Vowles, R. W., & Lloyd, C. H. (1996). Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. *Journal of dentistry*, 24(1-2), 141-148.
- Mäkinen, T., Halonen, A., Koivisto, J., & Alava, M. J. (2022). Wood compression in four-dimensional *in situ* tomography. *Physical Review Materials*, 6(7), L070601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.L070601>
- Mang, T., Bobzin, K., & Bartels, T. (2011). *Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication*. (S.l.) : John Wiley & Sons.
- Margerie, P. (1976). Les entreprises utilisatrices de bois. *Revue forestière française*, 28(S), 117-129.
- McKenzie, W. M., & Karpovich, H. (1975). Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material. *Wood Science and Technology*, 9(1), 59-73.
- Murray, M. J., Mutton, P. J., & Watson, J. D. (1982). Abrasive wear mechanisms in steels.
- Nasnas, D. (2021). Optimisation des paramètres d'usinage en tournage dur basée sur la température de coupe. (S.l.) : (s.n.).
- Nati, C., Spinelli, R., & Fabbri, P. (2010). Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 583-587.
- Petrica, M., Badisch, E., & Peinsitt, T. (2013). Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear*, 308(1-2), 86-94.
- Pooley, C. M., & Tabor, D. (1972). Friction and molecular structure: the behaviour of some thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 329(1578), 251-274.
- Porankiewicz, B., Sandak, J., & Tanaka, C. (2005). Factors influencing steel tool wear when milling wood. *Wood Science and Technology*, 39(3), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0282-0>

- Remadna, M., & Rigal, J. F. (2006). Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 67-75.
- Ressources naturelles Canada. (2022). Aperçu de l'industrie forestière du Canada. Repéré à <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets/industrie-commerce/apercu-lindustrie-forestiere-canada/13312>
- Ribeiro, J. E., César, M. B., & Lopes, H. (2017). Optimization of machining parameters to improve the surface quality. *Procedia Structural Integrity*, 5, 355-362.
- Roberts, G. A., Kennedy, R., & Krauss, G. (1998). *Tool steels*. (S.l.) : ASM international.
- Sassus, F., Almérás, T., Gril, J., & Yamamoto, H. (2005). Modélisation des déformations de maturation de la fibre. *arXiv preprint physics/0503205*.
- Seetharaman, S. (2005). *Fundamentals of metallurgy*. (S.l.) : Taylor & Francis.
- Sevim, I., & Eryurek, I. B. (2006). Effect of fracture toughness on abrasive wear resistance of steels. *Materials & Design*, 27(10), 911-919. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.009>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Stewart, J. S., & Feld, H. (2003). Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*, 255(7-12), 1433-1437.
- Slim, B. M. (2010). *Modélisation hybride du frottement local à l'interface outil-copeau en usinage des alliages métalliques*. Arts et Métiers ParisTech.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4. ed). Amsterdam : BH, Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Testing, A. I. C. E.-28 on M. (2019). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. (S.l.) : ASTM international.
- Tools, T.-L. T. with S.-P. T. (1993). International standards, ISO 3685–1993 (E). International Organization for Standardization Geneva.
- Vander, G. F. (2004). Metallographic techniques for tool steels. *Materials Park, OH: ASM International*, 2004., 644-669.
- Walker, J. C. (2006). *Primary wood processing: principles and practice*. (S.l.) : Springer Science & Business Media.
- Wang, S.-H., Chen, J.-Y., & Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(11), 3446-3458. <https://doi.org/10.1016/j.surfcot.2004.10.125>

- Wei, S., & Xu, L. (2019). Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials. *Acta Metall Sin*, 56(4), 523-538.
- Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual.* (s.d.). (S.1.) : (s.n.).
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z., & Militz, H. (2013). Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. *Eur. J. Wood Wood Prod*, 71(4), 401-416.
- Zemzemi, F., Rech, J., Bensalem, W., Kapsa, P., & Dogui, A. (2007). Analyse du frottement aux interfaces pièce-outil-copeau au cours de l'usinage d'un acier 42CrMo4. Dans *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- Zmitrowicz, A. (2006). Wear patterns and laws of wear—a review. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 44(2), 219-253.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELALI, H. B., SALEM, W. B., RECH, J., DOGUI, A., & KAPSA, P. (s.d.). Corrélation des mécanismes d'usure en frottement et en usinage de l'acier AISI 1045.
- Achour, A. (2006). Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement.
- Affatato, S., & Brando, D. (2013). Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants. Dans *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints* (pp. 3-26). (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096128.1.3>
- Aghababaei, R., Warner, D. H., & Molinari, J.-F. (2016). Critical length scale controls adhesive wear mechanisms. *Nature communications*, 7(1), 11816.
- Aknouche, H., Outahyon, A., Nouveau, C., Marchal, R., Zerizer, A., & Butaud, J.-C. (2009). Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood. *journal of materials processing technology*, 209(6), 2918-2922.
- Ameur, T., Assas, M., & Mazouz, H. (2007). Optimisation des paramètres de coupe en utilisant l'algorithme à essaim de particules. *Matériaux & techniques*, 95(6), 371-380.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P. T., Yang, S., Cooke, K. E., & Teer, D. G. (2008). Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(14), 1578-1584. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011>
- Astakhov, V. P. (2004). The assessment of cutting tool wear. *International journal of machine tools and manufacture*, 44(6), 637-647.
- ATIBT, A. T. I. D. B. T. (2016). LES NIVEAUX DE TRANSFORMATION DU BOIS. Repéré à <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/04/Les-niveaux-de-transformation-du-bois-2017-ATIBT-FR-ENG.pdf>
- Barrow, G. (1972). Wear of cutting tools. *Tribology*, 5(1), 22-30.
- Bayer, A. M., & Becherer, B. A. (1989). High-Speed Tool Steels. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 51-59). (S.l.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002121>
- Bayoumi, A.-M., Bailey, J. A., & Stewart, J. S. (1983). Comparison of the wear resistance of various grades of cemented carbides that may find application in wood machining. *Wear*, 89(2), 185-200.
- Bencheikh, I. (2018). *Simulation multi-étapes de l'usure des outils de coupe revêtus par une modélisation XFEM/Level-set*. Université de Lorraine.

- Black, J. T. (1989). Mechanics of Chip Formation. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 7-12). (S.l.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002117>
- BÖHLER K329. (2023). Repéré à <https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/k329/>
- BÖHLER W360 ISOBLOC. (2023). Repéré à <https://www.bohler.fr/fr/products/w360isobloc/>
- BOUHAMLA, K. (2009). *Étude de l'influence de la composition chimique sur la formation de la structure et la tenue à l'usure des fontes au chrome*. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Bourbonnais, R. (2003). *Econométrie* (Vol. 4). (S.l.) : Dunod.
- Bourithis, L., & Papadimitriou, G. D. (2009). The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique. *Wear*, 266(11-12), 1155-1164.
- BOUZID, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13*.
- Brajčinović, S., Begić Hadžipašić, A., & Medved, J. (2022). Inhibitory Effect of Commercial Inhibitor VCI 379/611 on the Corrosion Behaviour of HTCS-130 Tool Steel for Hot Work. *Metals*, 12(6), 966. <https://doi.org/10.3390/met12060966>
- Brink, T., & Molinari, J.-F. (2019). Adhesive wear mechanisms in the presence of weak interfaces: Insights from an amorphous model system. *Physical Review Materials*, 3(5), 053604.
- Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., León, L. M., & Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 259(1-6), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>
- Canale, L. C. F., Albano, L., Totten, G. E., & Meekisho, L. (2014). Hardenability of Steel. Dans *Comprehensive Materials Processing* (pp. 39-97). (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01219-X>
- Cayer-Barrioz, J. (2003). *Mécanismes d'usure de polymères orientés: Application à l'abrasion des fibres de polyamide*. Ecully, Ecole centrale de Lyon.
- Čerče, L., Pušavec, F., & Kopač, J. (2015). 3D cutting tool-wear monitoring in the process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 3885-3895.
- Chafik Labidi. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Sciences de l'ingénieur

- [physics]. Arts et Métiers ParisTech. Repéré à <NNT : 2006ENAM0058>. <pastel-00002491>
- Czibula, C., Seidlhofer, T., Ganser, C., Hirn, U., & Teichert, C. (2021). Longitudinal and transverse low frequency viscoelastic characterization of wood pulp fibers at different relative humidity. *Materialia*, 16, 101094.
- da Silva, L. J., Scheuer, C. J., & D’Oliveira, A. S. C. (2019). Effect of microstructure on wear performance of NiCrSiBC coatings. *Wear*, 428, 387-394.
- Dawson, T. G., & Kurfess, T. R. (2005). Quantification of tool wear using white light interferometry and three-dimensional computational metrology. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5), 591-596.
- Dearnley, P. A., & Aldrich-Smith, G. (2004). Corrosion-wear mechanisms of hard coated austenitic 316L stainless steels. *Wear*, 256(5), 491-499.
- DJAFRI, M. (2015). *Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant-application aux freins à disques*. University of sciences and technology in Oran.
- DK-SPEC portfolio outils de coupe. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/outils-coupe-industriels.html>
- DK-SPEC portfolio têtes d'équarisseur. (2023). Repéré à <https://www.dkspec.com/fr/tetes-equarrisseuses.html>
- Dolinšek, S., Šuštaršič, B., & Kopač, J. (2001). Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. *Wear*, 250(1-12), 349-356.
- Eyre, T. S. (1981). Wear mechanisms. *Powder Metallurgy*, 24(2), 57-63.
- Faga, M. G., & Settinieri, L. (2006). Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3002-3007. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.013>
- Feng, K., Smith, W. A., Borghesani, P., Randall, R. B., & Peng, Z. (2021). Use of cyclostationary properties of vibration signals to identify gear wear mechanisms and track wear evolution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107258.
- Ghosh, S. C., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Effect of knife wear on surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter. *Wood and Fiber Science*, 47(4), 355-364.
- Ghosh, Shyamal C., Heidari, M., Hernández, R. E., & Blais, C. (2015). Patterns of knife edge recession in an industrial chipper-canter. *Forest Products Journal*, 65(7-8), 358-364.

- Grenier, M. (1998). *Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane*. (S.l.) : Université Laval.
- He, F. J., Fang, Y. Z., & Jin, S. J. (2014). The study of corrosion-wear mechanism of Ni-W-P alloy. *Wear*, 311(1-2), 14-20.
- Heidari, M. (2019). *Improvement of cutting tool life for the primary transformation of wood*. Thèse de Doctorat. Université Laval, Québec, Canada. Repéré à <http://hdl.handle.net/20.500.11794/35717>
- Hernandez, R. E., & Lessard, J. (1997). Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter. *Forest products journal*, 47(3), 89.
- Hernandez, R. E., & Quirion, B. (1993). Effect of a chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce. *Forest Products Journal*, 43(9), 8.
- Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement: durabilité de la récolte de bois d'œuvre*. (2022). Gatineau QC : Environnement et changement climatique Canada = Environment and Climate Change Canada.
- International, A. (2004). *ASTM G65-04 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. (S.l.) : ASTM International West Conshohocken.
- Ionescu, C. C. (2012). *Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr*. Ecole Centrale Paris.
- Jakub, S., Bartosz, P., & Grzegorz, K. (2011). Measurement of the Cutting Tool Edge Recession with Optical Methods. Dans *Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar, Skellefteå, Sweden, 11p*.
- Jurkovic, J., Korosec, M., & Kopac, J. (2005). New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1023-1030.
- Kant, G., & Sangwan, K. S. (2014). Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. *Journal of cleaner production*, 83, 151-164.
- Kato, K. (2005). Classification of wear mechanisms/models. *Wear—materials, mechanisms and practice*, 9-20.
- Kato, Koji, & Adachi, K. (2000). Wear mechanisms. Dans *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology* (pp. 273-300). (S.l.) : CRC press.

- Kendall, L. A. (1989). Tool Wear and Tool Life. Dans ASM Handbook Committee, *Machining* (pp. 37-48). (S.l.) : ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002120>
- Kharrat, M., Baccar, M., & Dammak, F. (Éds). (2020). *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics: selected contributions from the 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM 2019, December 16-18, 2019, Hammamet, Tunisia*. Communication présentée au International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, Cham : Springer.
- Klamecki, B. E. (1979). A review of wood cutting tool wear literature. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 37(7), 265-276. <https://doi.org/10.1007/BF02607429>
- Knotek, O., Lugscheider, E., Löffler, F., Krämer, G., & Zimmermann, H. (1994). Abrasive wear resistance and cutting performance of complex PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 68-69, 489-493. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90206-2](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90206-2)
- Komotori, J., Hisamori, N., & Ohmori, Y. (2007). The corrosion/wear mechanisms of Ti-6Al-4V alloy for different scratching rates. *Wear*, 263(1-6), 412-418.
- Kovaříková, I., Szewczyková, B., Blaškoviš, P., Hodúlová, E., & Lechovič, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.
- Kowaluk, G., Szymanski, W., Palubicki, B., & Beer, P. (2009). Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(2), 173-176.
- Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. (S.l.) : Asm International.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. *Environments*, 5, 34.
- Labidi, C., Collet, R., Nouveau, C., Beer, P., Nicosia, S., & Djouadi, M. A. (2005). Surface treatments of tools used in industrial wood machining. *Surface and Coatings Technology*, 200(1), 118-122. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.098>
- Labidi, Chafik. (2006). *Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe*. Arts et Métiers ParisTech.
- Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F., & Man, H. C. (2000). Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 203-207. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00410-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00410-0)
- Lee, J.-H., Myagmar, G., Kwon, H.-B., & Han, J.-S. (2022). A digital method for wear volume loss analysis using a single-scan three-dimensional dataset. *Journal of Dental Sciences*, 17(1), 638-641.

- Mair, L. H., Stolarski, T. A., Vowles, R. W., & Lloyd, C. H. (1996). Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. *Journal of dentistry*, 24(1-2), 141-148.
- Mäkinen, T., Halonen, A., Koivisto, J., & Alava, M. J. (2022). Wood compression in four-dimensional *in situ* tomography. *Physical Review Materials*, 6(7), L070601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.L070601>
- Mang, T., Bobzin, K., & Bartels, T. (2011). *Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication*. (S.l.) : John Wiley & Sons.
- Margerie, P. (1976). Les entreprises utilisatrices de bois. *Revue forestière française*, 28(S), 117-129.
- McKenzie, W. M., & Karpovich, H. (1975). Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material. *Wood Science and Technology*, 9(1), 59-73.
- Murray, M. J., Mutton, P. J., & Watson, J. D. (1982). Abrasive wear mechanisms in steels.
- Nasnas, D. (2021). Optimisation des paramètres d'usinage en tournage dur basée sur la température de coupe. (S.l.) : (s.n.).
- Nati, C., Spinelli, R., & Fabbri, P. (2010). Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 583-587.
- Petrica, M., Badisch, E., & Peinsitt, T. (2013). Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear*, 308(1-2), 86-94.
- Pooley, C. M., & Tabor, D. (1972). Friction and molecular structure: the behaviour of some thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 329(1578), 251-274.
- Porankiewicz, B., Sandak, J., & Tanaka, C. (2005). Factors influencing steel tool wear when milling wood. *Wood Science and Technology*, 39(3), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0282-0>
- Remadna, M., & Rigal, J. F. (2006). Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 67-75.
- Ressources naturelles Canada. (2022). Aperçu de l'industrie forestière du Canada. Repéré à <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets/industrie-commerce/apercu-lindustrie-forestiere-canada/13312>
- Ribeiro, J. E., César, M. B., & Lopes, H. (2017). Optimization of machining parameters to improve the surface quality. *Procedia Structural Integrity*, 5, 355-362.

- Roberts, G. A., Kennedy, R., & Krauss, G. (1998). *Tool steels*. (S.l.) : ASM international.
- Sassus, F., Almérás, T., Gril, J., & Yamamoto, H. (2005). Modélisation des déformations de maturation de la fibre. *arXiv preprint physics/0503205*.
- Seetharaman, S. (2005). *Fundamentals of metallurgy*. (S.l.) : Taylor & Francis.
- Sevim, I., & Eryurek, I. B. (2006). Effect of fracture toughness on abrasive wear resistance of steels. *Materials & Design*, 27(10), 911-919. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.009>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Stewart, J. S., & Feld, H. (2003). Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*, 255(7-12), 1433-1437.
- Slim, B. M. (2010). *Modélisation hybride du frottement local à l'interface outil-copeau en usinage des alliages métalliques*. Arts et Métiers ParisTech.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4. ed). Amsterdam : BH, Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Testing, A. I. C. E.-28 on M. (2019). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. (S.l.) : ASTM international.
- Tools, T.-L. T. with S.-P. T. (1993). International standards, ISO 3685–1993 (E). International Organization for Standardization Geneva.
- Vander, G. F. (2004). Metallographic techniques for tool steels. *Materials Park, OH: ASM International*, 2004., 644-669.
- Walker, J. C. (2006). *Primary wood processing: principles and practice*. (S.l.) : Springer Science & Business Media.
- Wang, S.-H., Chen, J.-Y., & Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(11), 3446-3458. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.125>
- Wei, S., & Xu, L. (2019). Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials. *Acta Metall Sin*, 56(4), 523-538.
- Wide-Area 3D Measurement System VR-5000/VR-5200. User's manual*. (s.d.). (S.l.) : (s.n.).
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z., & Militz, H. (2013). Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. *Eur. J. Wood Wood Prod*, 71(4), 401-416.
- Zemzemi, F., Rech, J., Bensalem, W., Kapsa, P., & Dogui, A. (2007). Analyse du frottement aux interfaces pièce-outil-copeau au cours de l'usinage d'un acier 42CrMo4. Dans

CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.

Zmitrowicz, A. (2006). Wear patterns and laws of wear—a review. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 44(2), 219-253.