TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....3
1.1 Introduction.....3
1.2 Principes d'usinage 3
1.3 Processus de coupe 3
1.4 Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface.....4
1.4.1 Influence de la vitesse d'avance 6
1.4.2 Influence du rayon du bec de l'outil 7
1.4.3 Influence du mode de lubrification 8
1.5 Influence des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles 11
1.6 Méthodologie des plans d'expériences 17
1.7 Conclusion 20

CHAPITRE 2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....21
2.1 Introduction.....21
2.2 Système technologique 21
2.2.1 Machine d'usinage 21
2.2.2 Outil de coupe 23
2.2.3 Matériaux 24
2.2.4 Modes de lubrification 25
2.2.5 Pièces 26
2.3 Équipements de mesure 27
2.3.1 Rugosité 28
2.3.2 Contraintes résiduelles 29
2.3.3 Essais de traction avec extensomètre 30
2.4 Plan d'expériences 32
2.4.1 Procédure et sélection de plan..... 32
2.4.2 Codage des variables..... 34
2.4.3 Modèles de prédiction..... 35
2.4.4 Analyse des résultats..... 36
2.4.5 Validation du modèle..... 36
2.5 Conclusion 37

CHAPITRE 3 ÉTAT DE SURFACE.....39
3.1 Introduction.....39
3.2 Définition des paramètres de rugosité.....39
3.3 Résultats et analyse 42
3.3.1 Exemples de profils de rugosité de surface..... 42
3.3.2 Facteurs à effets significatifs sur les paramètres de rugosité 44
3.3.3 Étude des interactions et des effets principaux 47

3.3.4 Étude des paramètres de rugosité 51
3.3.5 Modélisation des équations de prédiction et surfaces de réponse 55
3.3.6 Optimisation de la rugosité de surface arithmétique R_a 66
3.3.6.1 Optimisation pour l'usinage à sec 66
3.3.6.2 Optimisation pour l'usinage à quantité minimale de lubrification MQL 68
3.3.6.3 Usinage à lubrification abondante 70
3.4 Conclusion 72

CHAPITRE 4 CONTRAINTES RÉSIDUELLES 73
4.1 Introduction 73
4.2 Analyse des contraintes résiduelles 73
4.2.1 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes résiduelles 74
4.2.2 Analyse Pareto des contraintes résiduelles 77
4.2.3 Analyse de l'homogénéité de la variance pour les contraintes résiduelles 79
4.2.4 Analyse des résidus pour les contraintes résiduelles 81
4.2.5 Contours de la surface de réponse estimée pour les contraintes résiduelles 82
4.3 Modélisation des équations de prédiction des contraintes résiduelles 84
4.3.1 Modélisation des contraintes résiduelles pour le 2024-T4 84
4.3.2 Modélisation des contraintes résiduelles pour le 6061-T6 86
4.4 Optimisation des contraintes résiduelles 89
4.5 Conclusion 92

CHAPITRE 5 RÉSISTANCE À LA TRACTION 93
5.1 Introduction 93
5.2 Analyse des résultats 94
5.2.1 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes ultimes 98
5.2.2 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes à la rupture Rm 103
5.2.3 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes élastiques Re 104
5.3 Modélisation des équations de prédiction des contraintes à la traction 105
5.4 Surfaces de réponses 110
5.5 Conclusion 112

CONCLUSION 113

RECOMMANDATIONS 115

ANNEXE I MATRICE DES RÉPONSES POUR LA RUGOSITÉ DE SURFACE 117

ANNEXE II EFFETS DES INTERACTIONS SUR R_q, R_v, R_c, R_{sm} et R_k 123

ANNEXE III RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À SEC DU 6061-T6 127

ANNEXE IV RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ DE LUBRIFICATION MINIMALE DU 6061-T6 131

ANNEXE V RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 6061-T6 135

ANNEXE VI RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE SEC DU 7075-T651 139

ANNEXE VII RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ MINIMALE DE LUBRIFICATION DU 7075-T651 143

ANNEXE VIII RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 7075-T651 147

ANNEXE IX RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ MINIMALE DE LUBRIFICATION DU 2024-T4 151

ANNEXE X RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 2024-T4 155

ANNEXE XI GRAPHIQUES DE COMPARAISON ENTRE LES VALEURS PRÉDITES ET RÉELLES DES PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ 159

ANNEXE XII MATRICE DES RÉPONSES POUR LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES 165

ANNEXE XIII MATRICE DES RÉPONSES POUR LE TEST DE TRACTION 167

ANNEXE XIV EFFETS PRINCIPAUX ET INTERACTIONS POUR Rm 169

ANNEXE XV EFFETS PRINCIPAUX ET INTERACTIONS POUR Re 171

ANNEXE XVI COURBES DE TRACTION 173

ANNEXE XVII GRAPHIQUES COMPARATIFS ENTRE LES VALEURS RÉELLES ET PRÉDITES DES LIMITES ÉLASTIQUES, RÉSISTANCES À LA RACTION ET CONTRAINTES ULTIMES POUR LE 6061-T6 ET LE 7075-T651 183

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 187

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Spécifications de la machine à commande numérique 22

Tableau 2.2 Caractéristiques des plaquettes de coupe utilisée 24

Tableau 2.3 Composition chimique des divers matériaux selon ASTM B-221-08 25

Tableau 2.4 Propriétés élastiques des divers matériaux 25

Tableau 2.5 Dimensions des éprouvettes.....27

Tableau 2.6 Matrice d'expériences.....34

Tableau 3.1 Coefficients de détermination suite à l'analyse ANOVA 44

Tableau 3.2 Coefficients de détermination suite à l'analyse ANOVA après suppression des facteurs non significatifs.....47

Tableau 3.3 Équations de prédiction des Ra.....55

Tableau 3.4 Équations de prédiction des Rq.....56

Tableau 3.5 Équations de prédiction des Rv.....57

Tableau 3.6 Équations de prédiction des Rc.....58

Tableau 3.7 Équations de prédiction des Rsm.....59

Tableau 3.8 Équations de prédiction des Rk.....59

Tableau 3.9 Paramètres de coupe optimaux en usinage S 66

Tableau 3.10 Réponses optimales en usinage S 66

Tableau 3.11 Paramètres de coupe optimaux en usinage MQL 68

Tableau 3.12 Réponses optimales en usinage MQL.....68

Tableau 3.13 Paramètres de coupe optimaux en usinage L.....70

Tableau 3.14 Réponses optimales en usinage L 70

Tableau 4.1 Paramètres de coupe optimaux en usinage S, MQL et L du 2024-T4 89

Tableau 4.2 Paramètres de coupe optimaux en usinage S, MQL et L du 6061-T6 90

Tableau 4.3 Réponses optimales des contraintes résiduelles.....90

Tableau 5.1 Équations de prédictions des limites élastiques.....106

Tableau 5.2 Équations de prédiction des contraintes à la rupture 107

Tableau 5.3 Équations de prédictions des contraintes ultimes 108

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Schéma des principales zones de coupe....4

Figure 1.2 Défauts de surface (Tirée de Cordebois et Colombié, 2008)....5

Figure 1.3 Variation de la rugosité de surface sous différentes conditions de lubrification en fonction de la vitesse d'avance pour le 6061-T6 (Tirée de Kouam et al., 2012)....6

Figure 1.4 Variation de la rugosité de surface en fonction du mode de lubrification pour différentes vitesses de coupe (Tirée de Sreejith, 2008)....8

Figure 1.5 Variation de la rugosité de surface à usinage Sec, MQL et à lubrification abondante de l'AISI-4340 (Tirée de Dhar et al., 2006)....9

Figure 1.6 Effet de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur la rugosité de surface du 6061-T6 (Tirée de Kouam et al., 2012)....10

Figure 1.7 Variation de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour l'acier C45 (Tirée de Leppert, 2011)....11

Figure 1.8 Définition des contraintes résiduelles d'ordres I, II et III (Tirée de Lu, 2006)....13

Figure 1.9 Résultats obtenus pour l'Acier UNI-ISO Fe370 (Tirée de Capello, 2005)....14

Figure 1.10 Résultats obtenus pour l'acier C45 (Tirée de Capello, 1999)....15

Figure 1.11 Résultats obtenus pour l'acier 39NiCrMo3 (Tirée de Capello, 1999)....15

Figure 2.1 Machine 3 axes CNC utilisée....22

Figure 2.2 Géométrie des plaquettes utilisées (Tirée de http://www.kennametal.com/fr/products.html)....23

Figure 2.3 Géométrie des éprouvettes usinées....27

Figure 2.4 Profilomètre Mitutoyo SJ-400....29

Figure 2.5 Machine de traction MTS830....31

Figure 2.6 Extensomètre à pince MTS 634 12E-25....32

Rapport-Gratuit.com

Figure 2.7 Diagramme expérimental 33

Figure 3.1 Définitions des paramètres de rugosité de surface (Tirée de http//www.techniques-ingenieur.fr) 41

Figure 3.2 Exemples de profils de rugosité de surface pour le 2024-T4 pour une vitesse d'avance de 0,10mm/tr en usinage à sec 42

Figure 3.3 Exemples de profils de rugosité de surface pour le 2024-T4 pour un rayon de bec de l'outil de 0,4mm en usinage à sec 43

Figure 3.4 Graphiques de Pareto complets pour les paramètres de Rugosité 45

Figure 3.5 Graphiques de Pareto pour les paramètres de Rugosité après élimination des facteurs non significatifs 46

Figure 3.6 Graphiques des effets principaux pour les paramètres de rugosité 48

Figure 3.7 Effets des interactions sur Ra 50

Figure 3.8 Graphique des effets directs pour Ra pour le 2024-T4 51

Figure 3.9 Graphiques de Pareto pour les paramètres de rugosité du 2024-T4 à sec 52

Figure 3.10 Graphique de comparaison entre les valeurs observées et prévues de Ra 53

Figure 3.11 Graphiques de normalité des résidus pour le 2024-T4 usiné à sec 54

Figure 3.12 Contours de la surface de réponse estimée pour le 2024-T4 usiné à sec 60

Figure 3.13 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage à sec 64

Figure 3.14 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage MQL 65

Figure 3.15 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage à lubrification abondante 65

Figure 3.16 Désirabilité en usinage S 67

Figure 3.17 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage sec 67

Figure 3.18 Désirabilité en usinage MQL 69

Figure 3.19 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage MQL 69

Figure 3.20 Désirabilité en usinage L 71

Figure 3.21 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage L 71

Figure 4.1 Effets principaux des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles74

Figure 4.2 Interactions des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles 75

Figure 4.3 Graphique de Pareto pour les contraintes résiduelles 77

Figure 4.4 Graphique de Pareto après sélection des facteurs significatifs 78

Figure 4.5 Comparaison entre les valeurs observées et prédites pour les contraintes résiduelles 80

Figure 4.6 Graphique de normalité des résidus pour les contraintes résiduelles 81

Figure 4.7 Contours de la surface de réponse estimée pour les contraintes résiduelles83

Figure 4.8 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage à sec pour le 2024-T4 84

Figure 4.9 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage MQL pour le 2024-T4 85

Figure 4.10 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage lubrifié pour le 2024-T4 86

Figure 4.11 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage à sec pour le 6061-T6 87

Figure 4.12 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage MQL pour le 6061-T6 88

Figure 4.13 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage lubrifié pour le 6061-T6 89

Figure 4.14 Graphique de la désirabilité pour une optimisation multi réponses des contraintes résiduelles 91

Figure 4.15 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité 91

Figure 5.1 Essai de traction uniaxiale (Tirée de Felder, 2007) 93

Figure 5.2 Effets directs pour UTS 95

Figure 5.3 Effets directs pour Re 96

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 5.4 Effets directs pour Rm 96

Figure 5.5 Interactions pour Re 97

Figure 5.6 Interactions pour Rm.....97

Figure 5.7 Interactions pour UTS.....98

Figure 5.8 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 2024-T4 99

Figure 5.9 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 6061-T6 99

Figure 5.10 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 7075-T651 .100

Figure 5.11 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 2024-T4.....101

Figure 5.12 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 6061-T6.....102

Figure 5.13 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 7075-T651.....102

Figure 5.14 Contraintes réelles Vs prédites pour le 2024-T4 en usinage à sec.....109

Figure 5.15 Contraintes réelles Vs prédite pour le 2024-T4 en usinage MQL 109

Figure 5.16 Contraintes réelles Vs prédites en usinage à lubrification abondante.....110

Figure 5.17 Contours des surfaces de réponses estimées pour les limites élastiques, contraintes ultimes et contraintes à la rupture.....111

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

S	Sec Usinage à sec
MQL	*Minimum Quantity Lubrication* Usinage à quantité minimale de lubrification
L	Lubrifié Usinage à lubrification abondante
ISO	*International Organization of Standardization* Organisation Internationale de Normalisation
ASTM	*American Society of Testing and Materials* Société américaine pour les essais des matériaux
R^2	Coefficient de détermination
DRX	Diffraction de Rayons X
D	Fonction désirabilité

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

f	Vitesse d'avance (mm/tr)
R_ε	Rayon du bec de l'outil de coupe (mm)
R_a	Rugosité moyenne arithmétique (µm)
R_q	Écart quadratique moyen de rugosité (µm)
R_v	Profondeur maximale de profil (µm)
R_c	Hauteur moyenne des éléments de profil (µm)
R_{sm}	Largeur moyenne des éléments du profil (µm)
R_k	Profondeur de base de rugosité (µm)
σ_s	Contraintes résiduelles (MPa)
R_m	Résistance à la rupture (MPa)
UTS	*Ultimate tensile strength* (MPa)
	Contrainte ultime à la traction (MPa)
R_e	Résistance élastique ou limite d'élasticité (MPa)
T4	État métallurgique correspondant à un matériau mis en solution, trempé et mûri
T6	État métallurgique correspondant à un matériau mis en solution, trempé et revenu
T651	État métallurgique correspondant à un matériau mis en solution, trempé et revenu

INTRODUCTION

De nos jours, l'industrie est de plus en plus exigeante quant à la qualité, la précision et la finition des pièces usinées afin de garantir une meilleure performance en service. Dans le domaine de la fabrication qui ne cesse de se développer, plusieurs procédés d'usinage sont utilisés afin d'aboutir aux pièces escomptées par enlèvement de matière. Plusieurs études portent sur l'optimisation des paramètres et conditions d'usinage afin de garantir un meilleur fini de surface des pièces usinées avec le minimum de défauts tolérés, répondant ainsi aux dessins de définition de conception, remplissant les fonctionnalités attendues et garantissant un maximum de durée de vie. De plus, lors de l'usinage, il a été prouvé que la chaleur produite et dégagée dans la zone de coupe peut avoir un impact négatif sur le fini de surface et sur l'usure des outils de coupe. Pour ce, plusieurs études se sont dirigées vers l'étude des effets des modes de lubrification sur l'intégrité de surface lors des opérations d'usinage allant de la lubrification à quantité minimale, ou « Minimum Quantity Lubrication » (MQL), jusqu'à la lubrification abondante, tout en tenant compte des facteurs économique et environnemental, sans oublier de respecter le critère primordial de la santé et sécurité au travail. Plusieurs études proposent la MQL comme solution optimale répondant aux différentes exigences industrielles et environnementales.

Dans cette étude effectuée en tournage, les effets des paramètres de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe et des modes de lubrification sur le fini de surface et sur la présence des contraintes résiduelles sont étudiés. Des tests de traction sur les échantillons usinés ont été performés afin de conclure sur les propriétés mécaniques des alliages choisis pour l'étude, soient les alliages d'aluminium 2024-T4, 6061-T6 et 7075-T651, connus pour leur légèreté et leurs bonnes propriétés mécaniques.

La méthode des plans d'expériences sera utilisée dans ce projet de recherche et consiste en la planification d'un plan d'expérimentation comportant un certain nombres d'essais. Ce plan sera choisi d'une manière permettant de tenir compte des effets des différents facteurs choisis pour l'étude et leurs interactions sur les réponses afin de garantir une bonne précision des

résultats obtenus. Le projet permettra de conclure sur les conditions optimales de coupe et des modes de lubrification afin de garantir une meilleure intégrité de surface et une meilleure performance en service. Des modèles empiriques de prédiction seront proposés et une optimisation sera suggérée pour quelques réponses.

La présentation du travail sera répartie comme suit :

- Le chapitre 1. Revue bibliographique présente quelques travaux traitant de l'intégrité de surface, ainsi qu'un aperçu sur l'utilisation de la stratégie des plans d'expériences en usinage;
- Le chapitre 2. Procédures expérimentales présente les matériaux utilisés, les conditions et paramètres expérimentaux étudiés, le choix du plan d'expériences et la méthode de modélisation suivie;
- Le chapitre 3. État de surface étudie les modes de lubrification et les conditions de coupe qui influent sur le fini de surface et propose des modèles mathématiques de prédiction des paramètres de rugosité étudiés ainsi qu'une optimisation des facteurs pour quelques réponses;
- Le chapitre 4. Contraintes résiduelles étudie les modes de lubrification et les conditions de coupe qui influent sur les contraintes résiduelles dues à l'usinage et créées en surface sur deux matériaux choisis (le 2024-T4 et le 6061-T6) et propose des modèles mathématiques de prédictions des contraintes étudiées ainsi qu'une optimisation des facteurs;
- Le chapitre 5. Résistance à la traction unixiale étudie le degré de résistance à la rupture de chacun des matériaux pour les éprouvettes usinées des différents matériaux et présente les effets des différentes conditions de coupe et modes de lubrification sur les résultats collectés des essais de traction.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature scientifique succincte sur les relations entre l'usinage, le fini de surface et les contraintes résiduelles des surfaces usinées. Des résultats de travaux de recherche dérivant du même domaine que ce projet et un aperçu sur l'utilisation de la stratégie des plans d'expériences en usinage sont présentés.

1.2 Principes d'usinage

L'usinage consiste en toute opération de mise en forme par enlèvement de matière dans le but d'aboutir à une forme voulue d'une pièce brute tout en respectant les dimensions et l'état de surface prédéfinis dans la marge de tolérance donnée dans le dessin de définition.

En industrie, les procédés d'usinage par enlèvement de matière des pièces métalliques à l'aide des machines-outils sont considérés comme les procédés de mise en forme les plus performants et les plus précis. Un mouvement de coupe et un mouvement d'avance sont combinés pour générer les formes escomptées. La surface voulue est générée grâce à un travail de forme dû à la forme de l'outil et un travail d'enveloppe causé par la trace de l'arête de l'outil.

1.3 Processus de coupe

Le processus de coupe consiste principalement en la création et l'évacuation des copeaux afin d'aboutir à une pièce qui répond aux exigences du concepteur. Ce processus met en jeu plusieurs phénomènes mécaniques et thermiques ayant lieu dans les zones de coupe schématisées dans la figure 1.1.

Rapport-Gratuit.com

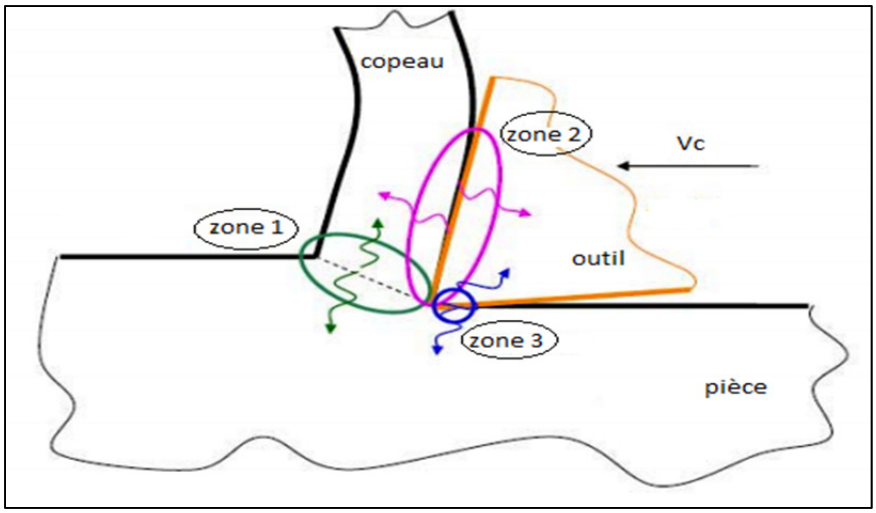


Figure 1.1 Schéma des principales zones de coupe

Les principales zones de coupe sont :

- Zone 1 : C'est la zone de cisaillement primaire qui est le siège d'une déformation plastique et d'une élévation importante de la température dues à la séparation du métal en deux.
- Zone 2 : C'est la zone de cisaillement secondaire qui subit de fortes déformations plastiques dues aux frottements entre le copeau et l'outil de coupe.
- Zone 3 : C'est la zone de cisaillement tertiaire entre la surface usinée et la face de dépouille. Cette zone est la moins énergétique des zones de coupe.

1.4 Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface

Les surfaces usinées présentent, dans la plupart des cas, des défauts, des irrégularités et des écarts par rapport à une surface idéale. Ceux-ci sont dus aux matériaux, aux outils de coupe utilisés et leur degré d'usure, et aux conditions de coupe. Les défauts macro géométriques et ceux micro géométriques peuvent dériver des problèmes vibratoires liés au système technologique, tels que les balourds des pièces ou des outils, aux vibrations des machines ou aux phénomènes de coupe. Ces défauts peuvent être classés suivant 4 ordres (figure 1.2) :

- Ordre 1 : écarts de forme et de position dus au procédé d'usinage tel que la déformation de la pièce, ou au matériau par libération des contraintes internes ou à des défauts au niveau de la machine d'usinage tels que les défauts de bridage et l'usure des organes entre autres;
- Ordre 2 : ondulations causées principalement par les problèmes vibratoires liés au système technologique tels que les balourds des pièces ou des outils et les vibrations des machines;
- Ordre 3 : stries et sillons dus aux phénomènes de coupe;
- Ordre 4 : arrachements dus aux phénomènes de coupe.

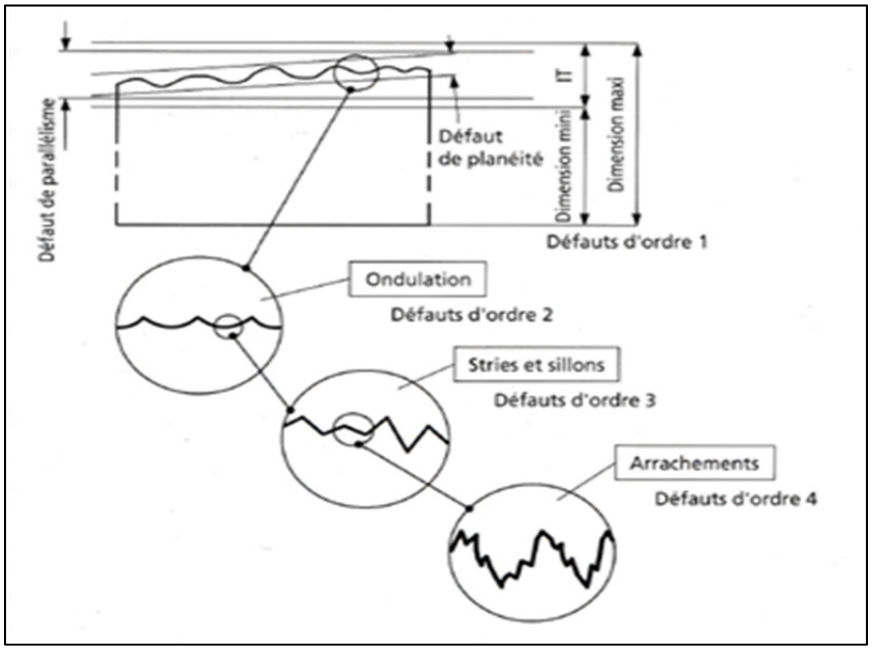


Figure 1.2 Défauts de surface
(Tirée de Cordebois et Colombié, 2008)

La rugosité de surface est définie par les défauts d'ordres 3 et 4. Son origine est fortement liée aux conditions de coupe telles que l'avance ou la géométrie de l'outil, encore, à l'hétérogénéité du matériau et ses propriétés plastiques. Le mode de lubrification et les vibrations de l'outil ou de la pièce peuvent aussi avoir une influence sur la rugosité de surface, communément appelée fini de surface.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4.1 Influence de la vitesse d'avance

Kouam et al. ont démontré que la rugosité de surface dépend de la vitesse d'avance sous différentes conditions de lubrification de l'usinage en tournage de l'alliage d'aluminium 6061-T6 (Kouam et al., 2012) (figure 1.3).

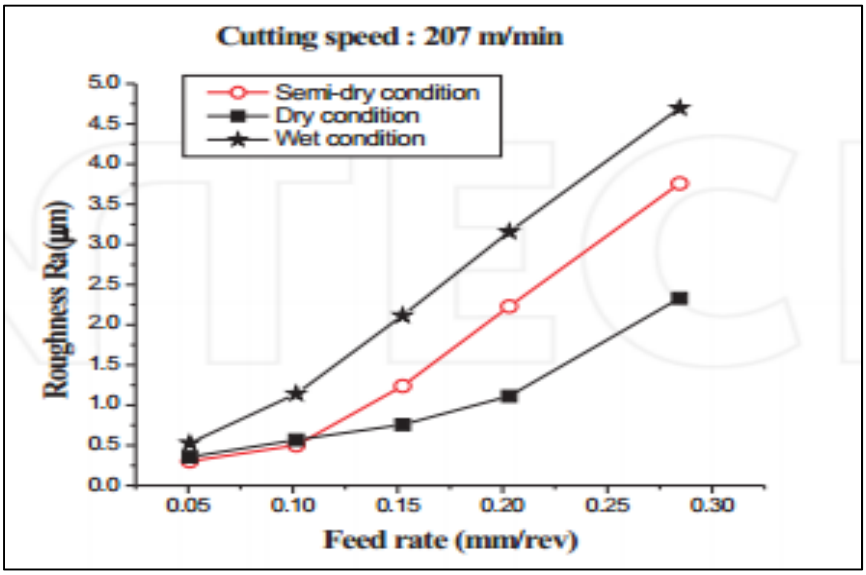


Figure 1.3 Variation de la rugosité de surface
sous différentes conditions de lubrification
en fonction de la vitesse d'avance pour le 6061-T6
(Tirée de Kouam et al., 2012)

Kamguem et al. ont démontré dans leur investigation du fini de surface de pièces usinées en Al2024-T351, 7075-T6 et 6061-T651 que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface (Kamguem et al. , 2013).

Davim a démontré, suite à son étude des conditions de coupe en tournage des composites à matrice métallique, que la vitesse d'avance est celle qui influence le plus la rugosité de surface suite à une analyse d'un plan d'expériences basée sur la méthode de Taguchi (Davim, 2003).

Tomac et al. ont prouvé, suite à leurs expérimentations, l'existence d'une corrélation étroite entre les valeurs de la rugosité de surface des composites à matrice aluminium usinés en tournage et les vitesses d'avance (Tomac et al., 1992). Ils ont enregistré un meilleur état de surface pour les avances les plus faibles et ont expliqué que le fait d'utiliser un rayon de l'ordre de 0,4 mm n'ayant pas d'affinité avec le matériau de coupe grâce à son revêtement PCD et à son rayon pointu est optimal pour le fini de surface.

Boothroyd a proposé un modèle qui demeure communément utilisé pour estimer la valeur de rugosité de surface (Boothroyd, 1988).

$$Ra = \frac{f^2}{32R_\varepsilon} \tag{1.1}$$

Avec :

- R_a : rugosité moyenne arithmétique (µm);
- f : vitesse d'avance (mm/tr);
- R_ε : rayon du bec de l'outil de coupe (mm).

1.4.2 Influence du rayon du bec de l'outil

Neşeli et al. ont étudié l'effet de la géométrie de l'outil sur la rugosité de surface dans l'opération de tournage en se basant sur la méthode de surface de réponse de l'acier AISI 1040 (Neşeli et al., 2011). Un modèle quadratique de la rugosité a été développé avec un intervalle de confiance de 96%. Ils ont démontré que le rayon du bec de l'outil est le plus significatif en comparaison avec l'angle d'approche et l'angle de coupe avec une contribution de plus que 50% dans la variabilité totale du modèle proposé.

Sung et al. ont exposé l'importance de l'effet de la tolérance du rayon du bec de l'outil sur la variation de la rugosité de surface à partir de simulations et d'expériences et ce en utilisant des rayons variables (Sung et al., 2014).

1.4.3 Influence du mode de lubrification

Plusieurs études ont prouvé que la lubrification à quantité minimale présente un compromis entre l'usinage à sec et l'usinage à lubrification abondante amenant à de meilleurs résultats du point de vue intégrité de surface. (Sreejith, 2008), (Dhar et al., 2006), (Kouam et al., 2012), (Ramana et al., 2014).

Plusieurs travaux se sont focalisés sur la réduction de la quantité des fluides de coupe comme solution aux divers problèmes économiques, environnementaux et juridiques liés à l'usinage conventionnel afin d'assurer un usage optimal de la lubrification afin d'aboutir à de meilleurs résultats du point de vue qualité de surface.

Sreejith a analysé les effets de l'usinage à sec, à quantité minimale de lubrification et à lubrification abondante sur la rugosité en tournage de l'alliage d'aluminium 6061-T6. Une étude comparative a mené au fait que la quantité minimale de lubrification peut remplacer la lubrification abondante. La MQL a donné des résultats semblables à ceux de la lubrification abondante (figure 1.4) et est la plus adéquate afin d'améliorer l'usinabilité et pour le respect de l'environnement et des raisons économiques (Sreejith, 2008) (figure1.4).

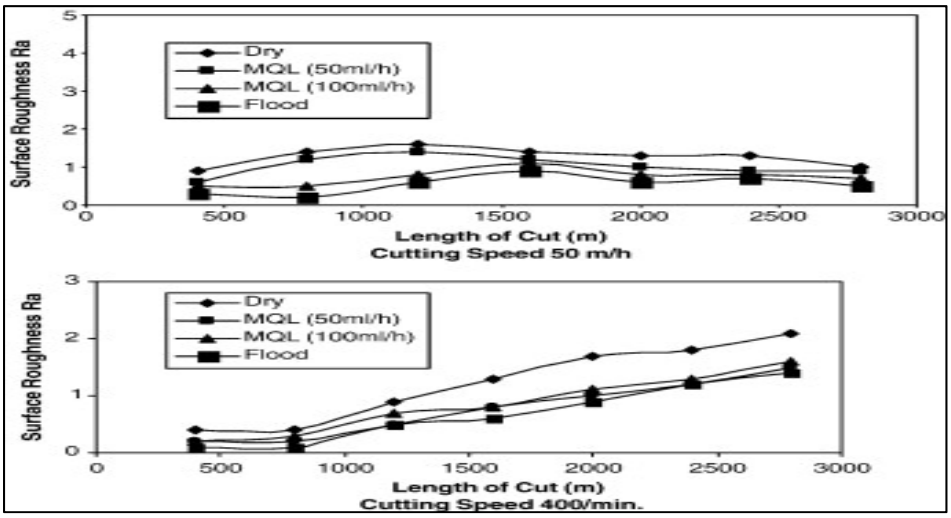


Figure 1.4 Variation de la rugosité de surface en fonction du mode de lubrification pour différentes vitesses de coupe (Tirée de Sreejith, 2008)

Dhar et al. ont conclu, suite à une étude expérimentale sur l'acier AISI-4340, que l'usinage à quantité minimale de lubrification est meilleur que l'usinage à lubrification abondante et que l'usinage à sec en fournissant une rugosité de surface améliorée due à la réduction de l'usure et les dommages qui peuvent avoir lieu à la pointe de l'outil de coupe (Dhar et al., 2006) (figure 1.5).

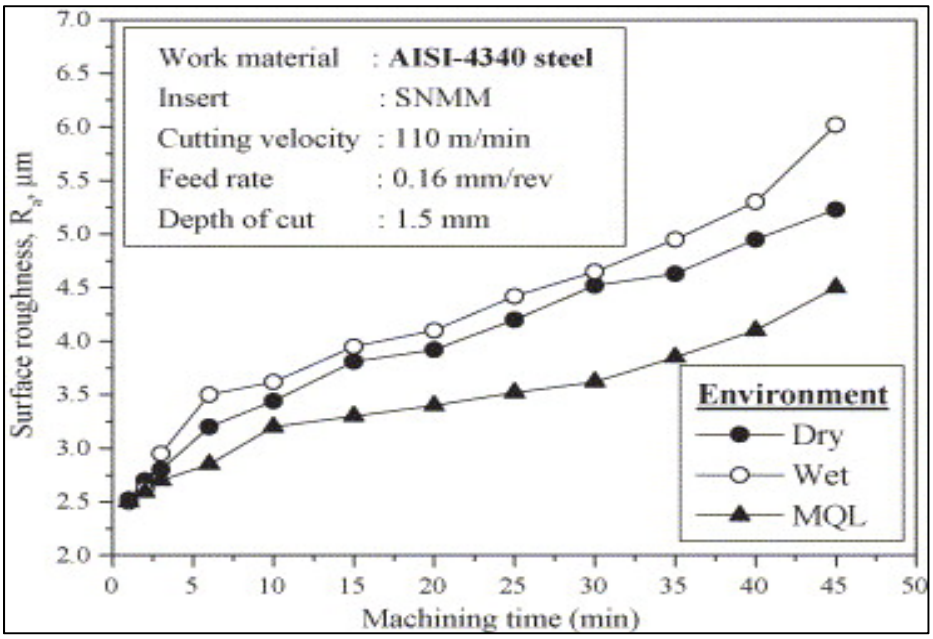


Figure 1.5 Variation de la rugosité de surface à usinage Sec, MQL
et à lubrification abondante de l'AISI-4340
(Tirée de Dhar et al., 2006)

Les travaux de Kouam et al. (Kouam et al., 2012) ont montré qu'à différentes conditions de lubrification, la vitesse de coupe n'intervient pas sur la rugosité de surface en usinage en tournage de l'alliage d'aluminium 6061-T6. Cependant, ils ont montré qu'elle dépend essentiellement de la vitesse d'avance qui a présenté le meilleur état de surface pour une valeur minimale (figure 1.6).

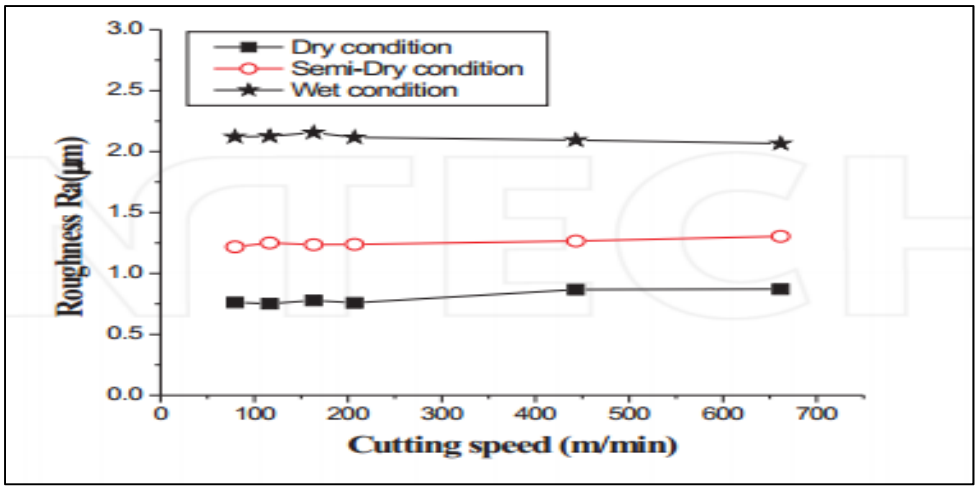


Figure 1.6 Effet de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur la rugosité de surface du 6061-T6
(Tirée de Kouam et al., 2012)

Leppert a analysé l'influence de la vitesse d'avance sous différentes conditions de lubrification sur la rugosité de surface. Il a constaté que l'augmentation de la vitesse d'avance entraine une augmentation de la rugosité de surface et que la quantité minimale de lubrification garantit un meilleur état de surface permettant aussi d'améliorer les conditions écologiques d'usinage en évitant d'utiliser beaucoup de fluide de coupe ou d'usiner à sec (Leppert, 2011) (figure 1.7).

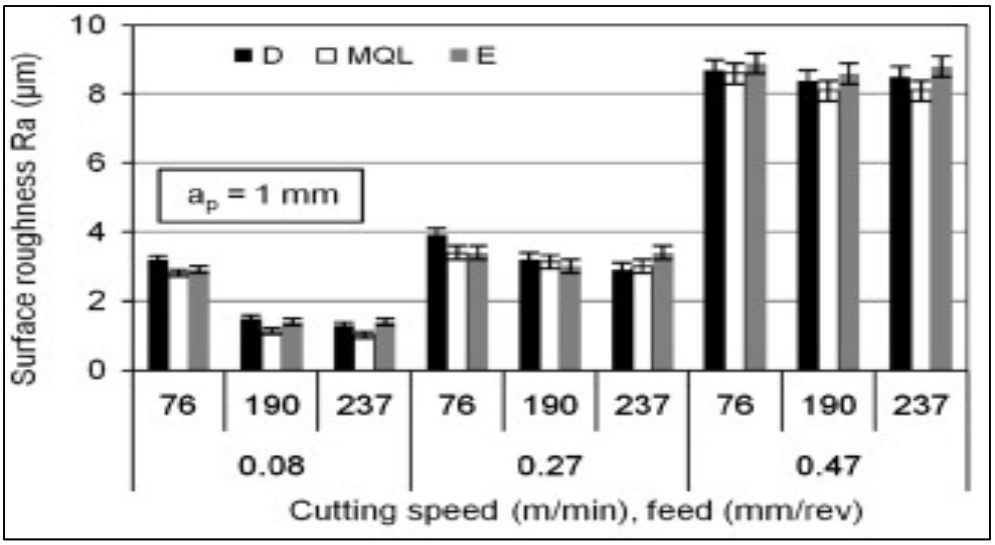


Figure 1.7 Variation de la rugosité de surface en fonction
de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour l'acier C45
(Tirée de Leppert, 2011)

Ramana et al. ont constaté que la MQL d'un alliage de titane présente une meilleur qualité de surface par rapport à l'usinage sec (S) ou à lubrification abondante (L) (Ramana et al., 2014).

1.5 Influence des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles

Une surface intègre est une surface qui présente toutes les qualités nécessaires afin d'assurer une utilisation optimale et une durée de vie satisfaisante. Parmi ces qualités à contrôler et d'un point de vue mécanique, une pièce doit absolument être capable de supporter les chargements mécaniques auxquels elle sera soumise une fois en service. Les contraintes résiduelles, qui sont des contraintes statiques auto-équilibrées existant dans un solide en équilibre soumis à aucune sollicitation externe, sont l'une des composantes principales de l'intégrité de surface. En usinage, ces contraintes peuvent être générées par la séparation du matériau au niveau de l'arête de coupe, ce qui engendre une augmentation de la température à la surface et une déformation plastique non homogène. Les propriétés du matériau usiné, les caractéristiques et états d'usure des outils de coupe, et les conditions de coupe influent sur l'état des contraintes résiduelles (Cordebois et Colombié, 2008) .

Les contraintes résiduelles peuvent être classées en fonction de leurs échelles d'apparition en trois catégories. La figure 1.8 illustre les trois ordres des contraintes résiduelles (Lu, 2006). Les contraintes d'ordre I, ou contraintes macroscopiques, sont des contraintes homogènes qui s'étendent sur plusieurs grains à l'échelle de quelques dixièmes de millimètre. Quant aux contraintes d'ordre II, ou contraintes microscopiques homogènes, sont des contraintes homogènes qui s'étendent sur de petits domaines, c'est-à-dire sur un grain ou une portion de grain à quelques dizaines de micromètres. Les contraintes d'ordre III, ou contraintes microscopiques hétérogènes, sont, quant à elles, des contraintes qui s'étendent sur quelques distances interatomiques à une échelle de quelques dizaines de nanomètres. Dans un matériau, la superposition des trois ordres nous renseigne sur l'état des contraintes résiduelles d'un point de vue macroscopique et d'un point de vue microscopique.

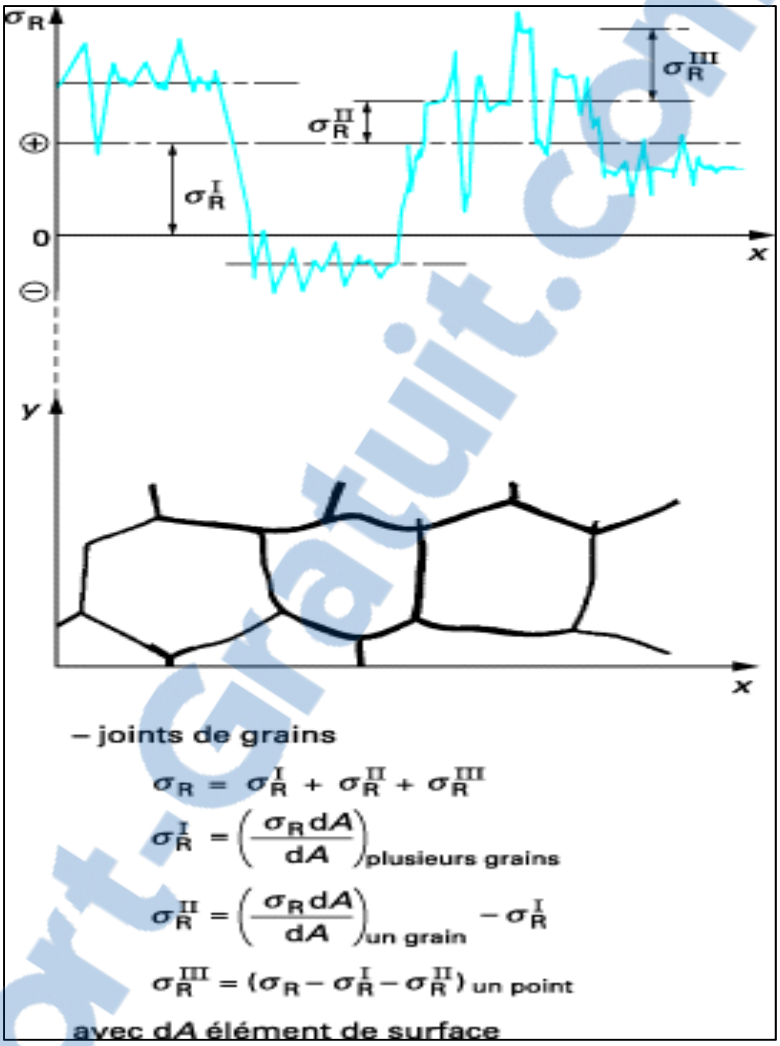


Figure 1.8 Définition des contraintes résiduelles
d'ordres I, II et III
(Tirée de Lu, 2006)

Plusieurs travaux sur la prédiction des contraintes résiduelles en tournage ont été élaborés en optant pour différentes approches scientifiques soient expérimentalement, analytiquement ou numériquement.

Pour ce qui est de l'approche expérimentale, des études ont mis le point sur l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse d'avance, la profondeur de passe, la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil. À chaque modification du paramètre de coupe, les contraintes résiduelles sont obtenues à l'aide de plusieurs méthodes de mesures non-destructives telle

Rapport-Gratuit.com

que la technique de diffraction des rayons X. Dans ses travaux de recherche sur l'acier, Capello (2005, 2006) a identifié l'effet de la vitesse d'avance, du rayon du bec de l'outil, de la profondeur de passe et de l'angle d'attaque sur trois aciers différents du point de vue propriétés mécaniques, sur les contraintes résiduelles. Cela a été mené en optant pour la méthode des plans d'expérience et une analyse ANOVA suite à l'usinage en tournage et des mesures des contraintes par la méthode de diffraction des rayons X. La variation des contraintes résiduelles est illustrée dans la figure 1.9, où l'avance et le rayon de bec de l'outil sont les paramètres les plus influents et figurent dans le modèle de prédiction proposée.

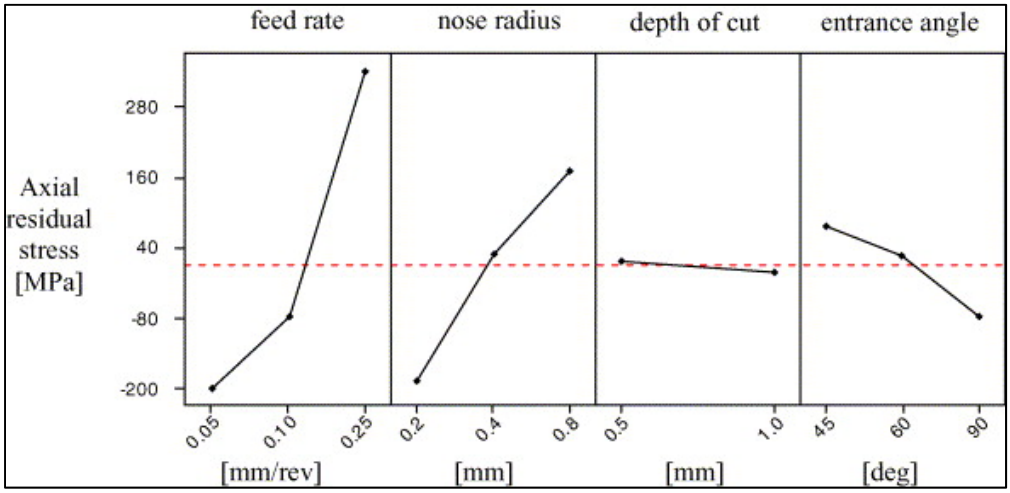


Figure 1.9 Résultats obtenus pour l'Acier UNI-ISO Fe370
(Tirée de Capello, 2005)

De plus, Capello et al.(Capello et al., 1999) ont abouti, dans leurs études sur les aciers C45 et 39NiCrMo3 usinés en tournage, au fait que, principalement, les contraintes résiduelles de surface obtenues sont essentiellement de traction. Ces contraintes sont influencées par la vitesse d'avance et par le rayon du bec de l'outil. L'angle d'attaque et la vitesse de coupe n'ont présenté qu'une influence négligeable. (figures 1.10 et 1.11).

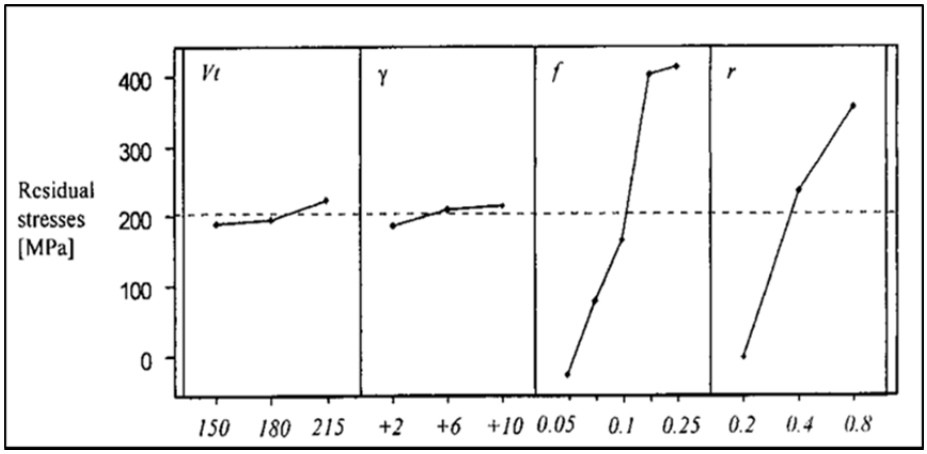


Figure 1.10 Résultats obtenus pour l'acier C45
(Tirée de Capello, 1999)

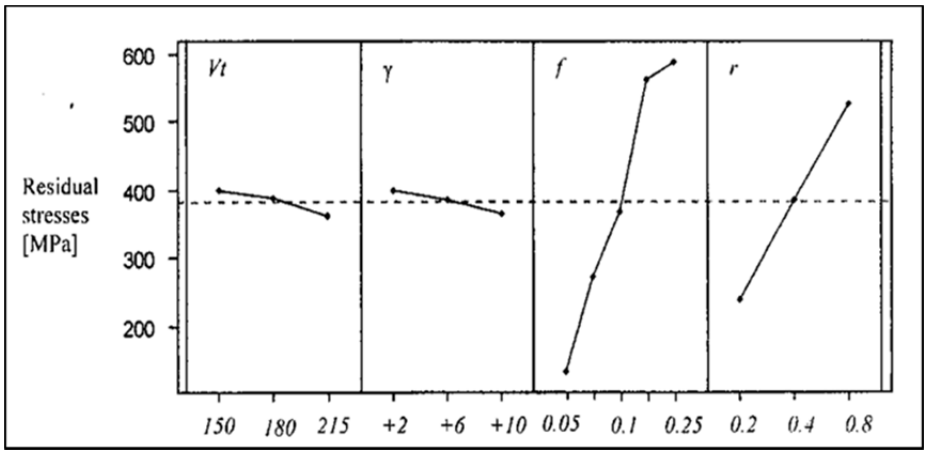


Figure 1.11 Résultats obtenus pour l'acier 39NiCrMo3
(Tirée de Capello, 1999)

Un modèle de prédiction reposant sur les paramètres les plus influents a été suggéré (équation 1.2).

$$\sigma_r = 1245 - 527 f^{-0.25} - 45{,}8\, r^{-1}\ [MPa] \tag{1.2}$$

Avec :

- σ_r contrainte résiduelle axiale;
- f vitesse d'avance;
- r rayon du bec de l'outil.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Jang et al. ont étudié les effets de la vitesse d'avance, de la profondeur de passe et du rayon du bec de l'outil en tournage sur les contraintes résiduelles de l'acier inoxydable AISI 304. Ils ont conclu que le rayon du bec de l'outil a l'effet le plus significatif (Jang et al., 1996).

Garcia Navas et al. ont étudié l'effet de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, du rayon du bec et du revêtement de l'outil. Ils ont conclu que l'augmentation du rayon du bec de l'outil entraine des contraintes résiduelles de traction plus élevées à cause de l'élévation de la température due au frottement dans la zone de coupe où la pression par unité de surface diminue, ce qui entraine une plus faible déformation plastique. Pour ce qui est de la vitesse d'avance, plus elle augmente, plus les contraintes résiduelle augmentent (García Navas et al., 2012).

Les travaux de Gunnberg et al. ont montré que les contraintes résiduelles de compression augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'avance lors de l'usinage en tournage de l'acier 18MnCr5, et que la valeur des contraintes résiduelles de compression diminuent avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil. (Gunnberg et al., 2006). Les travaux de Javidi et al. viennent appuyer cette constatation (Javidi et al, 2008).

Dahlman et al. ont expliqué dans leur étude sur l'influence de l'angle de coupe, de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe sur les contraintes résiduelles que la profondeur de coupe n'affecte pas les contraintes résiduelles et que l'augmentation de la vitesse d'avance entraine la génération de contraintes résiduelles plus compressives (Dahlman et al., 2004).

Da Silva et al. ont prouvé que la MQL n'a pas d'effet néfaste sur l'intégrité de surface. Tous leurs tests, dont le mode MQL a présenté les plus grandes valeurs, ont enregistrés des contraintes résiduelles de compression (da Silva et al., 2007).

1.6 Méthodologie des plans d'expériences

La méthodologie des plans d'expériences est l'une des méthodes les plus utilisées en recherche et développement afin d'améliorer la qualité dans le milieu industriel. Le but principal est de déceler les facteurs principaux ayant un effet significatif sur une ou plusieurs réponses en exécutant un certain nombre d'essais expérimentaux et d'aboutir à une prédiction par modélisation exprimant la relation entre chaque réponse et les facteurs sélectionnés en vue d'optimisation d'une ou de plusieurs réponses simultanément.
Plusieurs auteurs ont utilisé la stratégie des plans d'expérience afin d'étudier l'influence des conditions de coupe sur l'intégrité de surface de point de vue rugosité et présence de contraintes résiduelles.

Kandananond a utilisé la stratégie des plans d'expérience pour obtenir les meilleures conditions de coupe qui minimisent la rugosité de surface. Il a abouti à un modèle de prédiction qu'il a jugé satisfaisant dans le domaine de variation des facteurs qu'il a étudiés et qui sont la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et la vitesse d'avance (Kandananond, 2009).

Makadia et Nanavati ont développé un modèle de surface de réponse quadratique de la rugosité de surface en tournage de l'acier AISI 410 en fonction des paramètres de coupe. Ils ont conclu que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influent, suivi du rayon du bec de l'outil et de la vitesse de coupe. Suite à une optimisation, ils ont abouti à une combinaison optimale des paramètres d'usinage étudiés qui s'est avéré concluante avec un pourcentage acceptable (Makadia et Nanavati, 2013).

Puertas Arbizu et Luis Perez ont montré qu'un plan d'expériences factoriel combiné avec des techniques de régression peut être appliqué afin de modéliser le comportement de réponses en fonction de plusieurs variables. Ils ont abouti à un modèle polynomial de deuxième degré décrivant la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe (Puertas Arbizu et Luis Perez, 2003).

L'optimisation des procédés d'usinage reste une préoccupation majeure des chercheurs. Parmi les différentes méthodes d'optimisation, plusieurs ont opté pour la méthode de type plan d'expériences et surface de réponse pour le contrôle des conditions de coupe et opératoires.

Du fait que l'objectif principal peut être décrit par plusieurs réponses, une optimisation multi réponses s'impose en plus de celle individuelle pour éviter toute contradiction d'effet pour les niveaux de facteurs acceptables sur l'une des réponses sélectionnées et aboutir alors à une solution de compromis. Une satisfaction pour tout le processus sera alors atteinte. Dans ce contexte la fonction désirabilité peut être un moyen d'optimisation des réponses

La fonction désirabilité est une technique simple qui peut être utilisée pour trouver le meilleur compromis entre plusieurs réponses. C'est-à-dire qu'en prenant les équations de réponses générées et ayant des facteurs communs comme point de départ, on aboutit à une seule fonction qui est nommée réponse composite ou désirabilité. Les techniques de surface de réponse auront la tâche de l'optimiser (Myers et al., 2009). Cette fonction a été utilisée pour la première fois par Harrington (Harrington, 1965), puis par Derringer (Derringer, 1980). Cette fonction est très facile à utiliser et est intégrée dans la plupart des logiciels de calculs statistiques. La fonction de désirabilité varie entre 0 et 1. Ces valeurs extrêmes représentent respectivement un refus complet une satisfaction maximale.

Pour un problème de maximisation, la fonction désirabilité s'écrit :

$$d_{i=} \frac{y - y_{max-}}{y_{mini+} - y_{max-}} \tag{1.3}$$

Avec :

- d_i fonction élémentaire de désirabilité pour la fonction $y_{i;}$
- y_{max-} valeur la plus élevée de la réponse qui ne convient pas;
- y_{mini+} valeur la plus faible qui convient.

Pour un problème de minimisation, la fonction de désirabilité s'écrit :

$$d_{i=} \frac{y - y_{mini-}}{y_{max+} - y_{mini-}} \tag{1.4}$$

Avec :

- di fonction élémentaire de désirabilité pour la fonction yi;
- y_{mini-} valeur la plus faible qui ne convient pas;
- y_{max+} valeur la plus forte de la réponse qui convient.

Si nous souhaitons qu'une réponse prenne une valeur cible, la fonction désirabilité vaut 0 si on est loin de cette valeur et elle augmente petit à petit lorsqu'on s'approche de cette valeur. Si la valeur souhaitée est atteinte, la désirabilité vaut 1.

Dans le cas d'une optimisation multi réponses et une fois que la désirabilité élémentaire est définie pour chaque réponse, la désirabilité globale, présentant un compromis entre toutes les contraintes qui influent sur les réponses, est définie comme la moyenne géométrique des désirabilités individuelles.

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} d_i} \tag{1.5}$$

Cette désirabilité globale est égale à 1 si tous les buts sont atteints et que toutes les désirabilités individuelles valent 1. Elle est égale à 0 si au moins l'un des objectifs individuels n'est pas atteint. Dans le cas où toutes les désirabilités individuelles ne valent pas 0 et que certains buts sont atteints et d'autres partiellement, la valeur de la désirabilité globale est comprise entre 0 et 1. Dans notre étude d'optimisation proposée, nous opteront pour la fonction désirabilité comme moyen d'optimisation individuelle ou multi réponse (Goupy, 2005) .

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parcouru de façon succincte différents travaux de recherches qui se sont concentrés sur l'étude des effets et des conditions de coupe sur l'intégrité de surface.

Ce projet se situe dans le même contexte d'étude. Des expériences seront performées et des réponses relevant de l'intégrité de surface seront étudiées avec une approche statistique en utilisant les logiciels StatGraphics et Minitab et des modèles de prédictions seront proposés en utilisant la stratégie des plans d'expériences.

Dans le chapitre suivant, la procédure expérimentale adoptée dans de ce travail sera présentée.

CHAPITRE 2

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction

Lors des essais effectués, le matériau et les différents paramètres d'usinage dont l'avance, le rayon du bec de l'outil et les modes de lubrification, en tant que variables indépendantes, varient selon un plan d'expériences afin d'être reliés aux différentes réponses, à savoir la rugosité de surface et les contraintes résiduelles par des équations de prédiction. Des modèles mathématiques de prédiction de réponses sélectionnées sont proposés à la suite desquels des optimisations des facteurs ont été suggérées afin d'aboutir à de meilleurs résultats. Cependant, d'autres facteurs pouvant influencer nos réponses sont restés invariants telles que la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

2.2 Système technologique

Le système technologique assemble tous les facteurs maintenus invariants durant tout le déroulement des essais. Ce système est composé par :

2.2.1 Machine d'usinage

La machine-outil utilisée lors de l'opération d'usinage en tournage est celle à commande numérique Nexus QT100-II MS (figure 2.1) dont les spécifications sont présentées dans le tableau 2.1.

Figure 2.1 Machine 3 axes CNC utilisée

Tableau 2.1 Spécifications de la machine à commande numérique

Machine	Nexus QT100-II MS
Fabricant	Mazak (année 2007)
Puissance du moteur régime 30mns	11.0 kW
Contrôleur	Mazatrol 640M
Broches	1 en tournage (6000 TPM) 12 en fraisage (4500TPM)
Nombre d'outils	12 (tournage et fraisage)
Déplacements	X : 190mm, Z : 330mm [X : 7.5 po, Z : 13 po]
Avance rapide	30 m/mn (X), 33m/mn (Z) - [1181 po/mn (X) – 1299 po/mn (Z)]

2.2.2 Outil de coupe

L'usinage des matériaux, par exemple l'aluminium et ses alliages, nécessite un choix adéquat des outils de coupe en fonction de la nuance du matériau et de la nature de l'opération d'usinage entre ébauche, semi-finition et finition. Les propriétés recherchées pour les outils de coupe sont les suivantes :

- Une dureté meilleure que celle des matériaux à usiner;
- Une bonne rigidité permettant d'éviter toute déformation sous l'effet des contraintes survenant lors de l'opération d'usinage;
- Une bonne résistance mécanique;
- Une bonne tenue à chaud.

Les plaquettes utilisées (figure 2.2) sont des plaquettes en carbure de Kennametal avec un revêtement PVD-TiB_2 sur substrat non allié très résistant à la déformation. Ce revêtement, considéré comme un revêtement plus fort que les revêtements TiN et TiAIN, présente de bonnes performances et convient pour les travaux d'ébauche, de semi-finition et de finition de l'aluminium et de ses alliages. Il réduit les frottements et la formation des arêtes rapportées et assure un bon dégagement de copeaux et une bonne résistance à l'usure. Le tableau 2.2 résume les caractéristiques des outils de coupe utilisés.

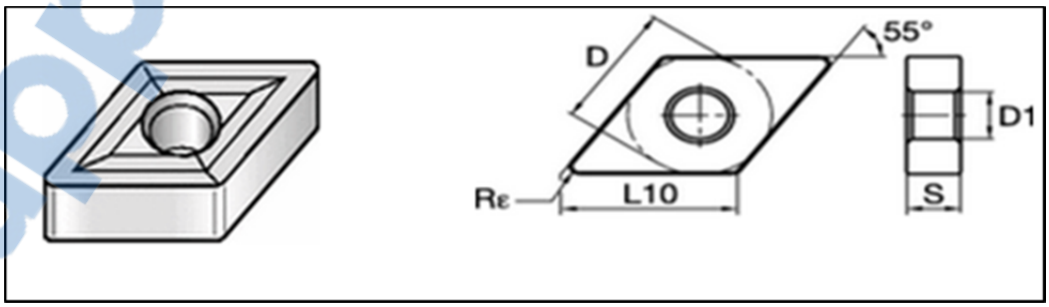


Figure 2.2 Géométrie des plaquettes utilisées
(Tirée de http://www.kennametal.com/fr/products.html)

Rapport-Gratuit.com

Tableau 2.2 Caractéristiques des plaquettes de coupe utilisée

Codification ISO	DNGP150402 KC5410	DNGP150404 KC5410	DNGP150408 KC5410
Revêtement	TiB_2	TiB_2	TiB_2
Rayon du bec de l'outil R_ε (mm)	0.2	0.4	0.8

2.2.3 Matériaux

Les alliages d'aluminium étudiés lors de ce travail sont identifiés selon la désignation internationale à quatre chiffres comme dans le « Teal Sheets – International Alloy Designations and Chemicals » de *l'Aluminum Association* qui est le document de référence, à savoir le 2024 (principal élément d'addition : le cuivre), le 6061 (principaux éléments d'addition : le silicium et le magnésium) et le 7075 (principal élément d'addition : le zinc). Les éléments d'addition confèrent aux alliages des propriétés structurales et mécaniques meilleures et nécessaires à leur mise en œuvre entrant en solution solide et formant des précipités. Le premier chiffre représente le groupe auquel l'alliage appartient. Le deuxième chiffre identifie les nuances dans lesquelles certaines impuretés sont des teneurs contrôlées. Quant aux troisième et quatrième chiffres, ils indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99%. Les trois alliages de l'étude sont des alliages trempants à durcissement par précipitation. Ce durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique adaptée amenant aux états suivants :

- 2024-T4 mis en solution et mûri (phase durcissante : Al_2Cu);
- 6061-T6 mis en solution et revenu (phase durcissante : Mg_2Si);
- 7075-T651 mis en solution et revenu (phases durcissantes : AlZn et $MgZn_2$).

Les tableaux 2.3 et 2.4 récapitulent les compositions chimiques ainsi que les propriétés élastiques des trois alliages d'aluminium étudiés selon la norme ASTM B-221-08.

Tableau 2.3 Composition chimique des divers matériaux selon ASTM B-221-08

Composition	Si(%)	Mg(%)	Fe(%)	Cr(%)	Cu(%)	Mn(%)	Zn(%)	Ti(%)	Al(%)
Al 7075-T651	Max 0.40	2,1-2,9	Max 0,5	0,18-0,28	1,2-2,0	Max 0,30	5,1-6,1	Max 0,2	Reste
Al 6061-T6	0.40-0.80	0.8-1.2	Max 0.7	0.04-0.35	0.04-0.35	Max 0.15	Max 0.25	Max 0.15	Reste
Al 2024-T4	Max 0,5	1,2-1,8	Max 0,5	Max 0,1	3,8-4,9	0,3-0,9	Max 0,25	Max 0.15	Reste

Tableau 2.4 Propriétés élastiques des divers matériaux

Al 2024-T4			**Al 6061-T6**			**Al 7075-T651**		
E	**G**	**υ**	**E**	**G**	**υ**	**E**	**G**	**υ**
MPa	**MPa**		**MPa**	**MPa**		**MPa**	**MPa**	
73000	27400	0,33	70000	26300	0,33	72000	27100	0,33

Avec :

- E module d'élasticité exprimé en MPa;
- G module de rigidité exprimé en MPa;
- υ coefficient de Poisson.

2.2.4 Modes de lubrification

Trois modes de lubrification ont été utilisés : S, MQL et L :

- Coupe à sec (S) :
  L'usinage s'effectue à sec sans apport de fluide de coupe.

- Coupe à quantité de lubrification minimale (MQL) :
  Le lubrifiant utilisé pour la lubrification minimale est le MECAGREEN 550, qui possède de hautes performances de refroidissement. C'est un lubrifiant réfrigérant, c'est-à-dire qu'il permet d'obtenir et de maintenir la température localement dans la zone de coupe inférieure à celle de l'environnement. De plus, il est hydrosoluble se présentant sous forme de concentré soluble dans l'eau, de phase lubrifiante, et est un complexe d'esters synthétiques d'origine végétale. Ce lubrifiant est particulièrement adapté à l'aluminium et ses alliages, ainsi qu'aux aciers inoxydables et ne laisse pas

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

de tâches. Connu pour son aspect économique et celui environnemental, il assure une durée de vie meilleure des outils de coupe et une bio stabilité. Sa composition chimique assure un environnement de travail sécuritaire et hygiénique. Le débit utilisé de ce lubrifiant lors des opérations d'usinage est de 3.06mL/min.

- Lubrification abondante

  Le lubrifiant utilisé en mode complètement lubrifié est le BLASOCUT BC 20 SW, destiné exclusivement à l'usage industriel et utilisé pour l'usinabilité et la rectification des matériaux métalliques et non métalliques. Il est plus destiné à l'usinage de la fonte, de l'acier et des alliages d'aluminium. Il est connu pour sa meilleure garantie d'un meilleur fini de surface et une meilleure durée de vie de l'outil. C'est un lubrifiant réfrigérant et un mélange d'huile minérale, d'émulsionnants, d'additifs extrême-pression EP anti-usure et d'inhibiteurs de corrosion.

2.2.5 Pièces

Les éprouvettes usinées en tournage ont la géométrie présentée dans la figure 2.3. Le tableau 2.5 regroupe les dimensions des éprouvettes usinées selon les appellations de leur géométrie présentées dans la figure 2.3.

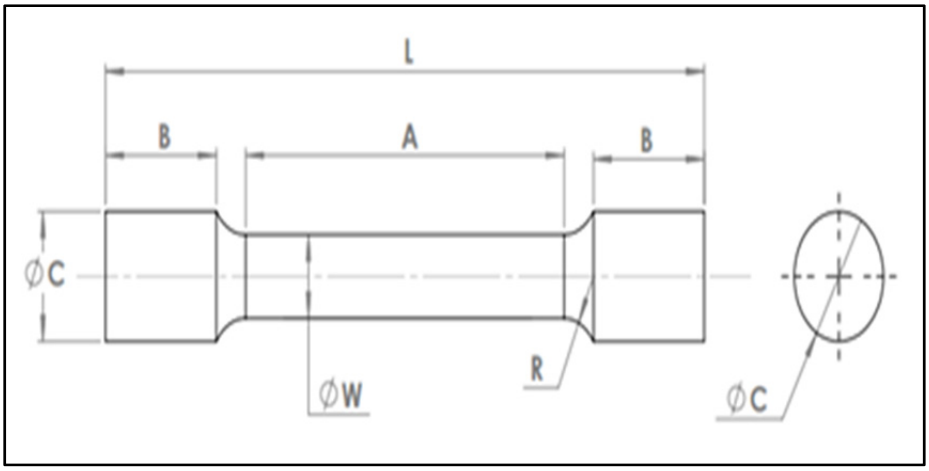


Figure 2.3 Géométrie des éprouvettes usinées

Tableau 2.5 Dimensions des éprouvettes

W largeur (po)	0,25
R rayon du filet (po)	3/8
L longueur totale (po)	4,5
A longueur de la section réduite (po)	1,75
B longueur de la section de serrage (po)	1,35
C largeur de la section de serrage (po)	0,5

2.3 Équipements de mesure

Pour chaque éprouvette usinée, la rugosité de surface, les contraintes résiduelles et la réponse à la traction unixiale ont été obtenues à l'aide de mesures faites avec les équipements suivants :

- profilomètre Mitutoyo SJ-400 de l'ÉTS pour la mesure de la rugosité de surface;
- diffractomètre à rayon X Proto XRD® de l'ÉTS pour la mesure des contraintes résiduelles de surface;
- machine de test hydraulique MTS810 de l'ÉTS pour les tests de traction uniaxiale.

2.3.1 Rugosité

Les différents paramètres de rugosité des pièces usinées sont mesurés parallèlement à l'avance de l'outil à l'aide du profilomètre Mitutoyo SJ-400 (figure 2.4) au sein du laboratoire de Métrologie de l'ÉTS. C'est un instrument électronique à palpeur permettant d'évaluer la rugosité de surface par contact entre une pointe en diamant et la surface à évaluer avec usage du logiciel SURFPAK-SJ permettant de générer les paramètres de rugosité retenus lors de cette étude entre autres paramètres.

L'instrument a été calibré au démarrage des mesures et les conditions de mesures suivantes ont été adoptées :

- Norme ISO 4287;
- Longueur d'évaluation 4mm;
- Longueur de référence (échantillonnage) 0,8mm;
- Vitesse 0,5mm/s;
- Type de filtre Gaussien.

Figure 2.4 Profilomètre Mitutoyo SJ-400

Les mesures sont effectuées parallèlement à l'avance de l'outil sous les mêmes conditions de point de vue environnement de travail. Le système de mesure est le même pour toutes les pièces testées. Les zones de mesures sont choisies aléatoirement au centre de chaque éprouvette.

2.3.2 Contraintes résiduelles

Dans cette étude, les mesures des contraintes résiduelles de surface ont été effectuées par une méthode non destructive, qui est la méthode de diffraction des rayons X par un diffractomètre à rayons X Proto XRD® de l'ÉTS.

Cette machine permet de bombarder une zone définie pour l'étude d'un échantillon par un faisceau monochromatique de rayons X qui subit une diffraction à la rencontre des plans cristallins du matériau vers deux détecteurs R1 et R2. C'est une méthode qui consiste en la mesure de la déformation au sein de la matière, qui est une propriété intrinsèque, et par la suite en le calcul des contraintes résiduelles, qui sont des contraintes moyennes arithmétiques

dans le volume du matériau défini par la zone irradiée. Ces contraintes sont déterminées par les constantes élastiques en supposant une déformation élastique linéaire du plan du réseau cristallin approprié. Bien que la mesure est jugée près de la surface et à quelques microns de profondeur, les rayons X pénètrent dans la matière, une partie est alors absorbée et l'autre est diffractée. La détermination des distances inter réticulaires, alors des déformations, se fait en suivant les déplacements des pics de diffraction X. La base de toutes les mesures de diffraction des rayons X est décrite par la loi de Bragg qui s'écrit :

$$n\lambda = 2d \sin 2\theta \tag{2.1}$$

Avec

- n entier indiquant l'ordre de diffraction;
- λ longueur d'onde des rayons X;
- d espacement des plans cristallins ou distance inter-réticulaire;
- 2θ angle de Bragg entre le faisceau des rayons X incident et celui diffracté.

Lors des mesures, chaque échantillon testé reste fixe. Seul l'assemblage portant le tube et les détecteurs se déplacent.

2.3.3 Essais de traction avec extensomètre

Les essais de traction uniaxiale ont été performés sur une machine de traction MTS 810 (figure 2.5). Les essais ont été pilotés à une vitesse de déplacement de traverse constante égale à 0,008mm/s et à température ambiante. La section de l'éprouvette dans sa partie calibrée est de 31,65mm^2. L'essai est considéré comme quasi statique.

Les déformations sont mesurées par un extensomètre MTS 634 12E-25 (figure 2.6) qui est un extensomètre axial à pince MTS 634 12E-25 de longueur de jauge 25mm. Son usage a permis de recueillir les données relatives à l'allongement et à la charge du système permettant ainsi de générer les courbes de traction.

Figure 2.5 Machine de traction MTS830

Figure 2.6 Extensomètre à pince MTS 634 12E-25

2.4 Plan d'expériences

La méthodologie du plan d'expériences passe par l'étape de construction du plan incluant la description du procédé, la définition du but de l'étude, le choix des réponses pour atteindre l'objectif fixé de l'étude, le choix des facteurs pouvant influencer les réponses définies ainsi que la définition des domaines de variation des facteurs choisis et le choix du plan. Des expériences sont réalisées par la suite selon le plan d'expériences choisi suivies d'analyses et d'interprétations.

2.4.1 Procédure et sélection de plan

Dans le cadre de notre étude, le choix du plan d'expériences s'est effectué selon les étapes suivantes:

- Définition du procédé : usinage en tournage;

- Définition du but de l'étude : déterminer l'influence des paramètres de coupe et des modes de lubrification sur le fini de surface, les contraintes résiduelles et sur la tenue en test de traction uniaxiale des pièces en alliages d'aluminium;
- Choix des réponses permettant d'atteindre les buts de l'étude : la rugosité de surface, les contraintes résiduelles, la tenue des pièces en suite à des tests de traction unixiale;
- Définition du domaine de variation de chaque facteur. Dans notre cas, les matériaux sont le 6061-T6, le 2024-T4 et le 7075-T6, le tournage s'effectue en modes S, MQL et L et le rayon du bec de l'outil (R_ε) varie entre 0.2, 0.4 et 0.8 mm;
- Choix d'un plan d'expérience. Dans cette étude, on a opté pour un plan factoriel complet nous permettant de tester nos variables à trois niveaux, et ce pour toutes les combinaisons possibles entre les facteurs étudiés;
- Exécution des expériences selon l'ordre défini dans le plan d'expérience;
- Analyse et interprétation des résultats.

Le diagramme expérimental suivant résume la définition du plan d'expériences choisi.

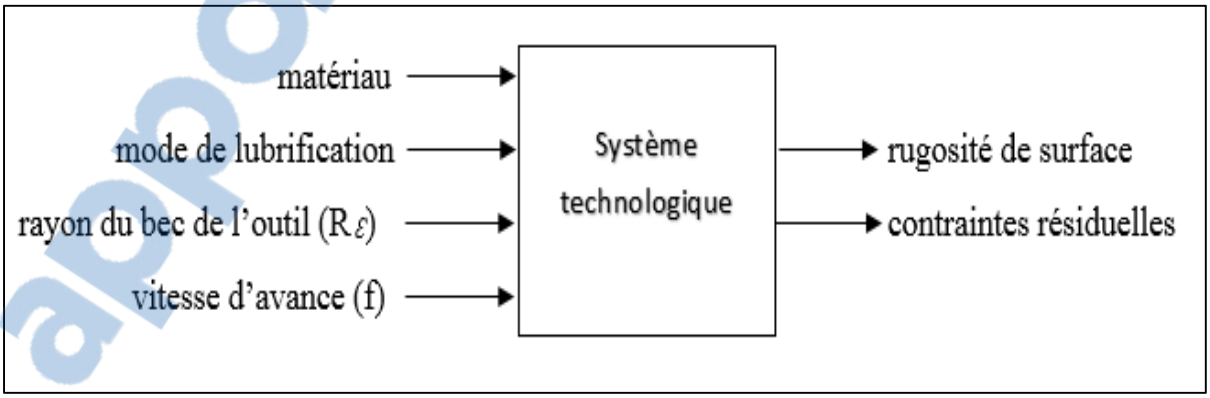


Figure 2.7 Diagramme expérimental

Rapport-Gratuit.com

2.4.2 Codage des variables

Afin de mener à bon escient les expériences, les facteurs peuvent être utilisés sous forme de leurs valeurs réelles ou sous forme de valeurs codées afin de mener par la suite des calculs précis quant à l'évaluation de l'effet de chacun des facteurs sur les différentes réponses. Les variables du plan d'expériences choisies sont manipulées sous forme de leurs valeurs réelles comme présentées dans le tableau 2.6. Le choix des rayons de bec de l'outil a été fait en fonction des rayons disponibles sur le marché local. Les niveaux de cette variable ne sont pas centrés et cela pourrait affecter les analyses statistiques. Pour cette raison, nous préférons travailler avec les valeurs naturelles.

Tableau 2.6 Matrice d'expériences

		Variables		**Niveau**		
Facteurs	**Unité**	**Naturelles**	**Codées**	**Bas(1)**	**Centre(2)**	**Haut(3)**
Matériau		AA	X1	6061	7075	2024
				1	2	3
Mode de lubrification		ML	X2	S	MQL	L
				1	2	3
Rayon du bec de l'outil	mm	R_ε	X3	0,2	0,4	0,8
Avance par tour	mm/tr	f	X4	0,05	0,10	0,15

Le domaine de chaque facteur définit l'espace expérimental pour réaliser les différents essais allant des niveaux bas aux niveaux hauts.

Les réponses du système sont :

- des réponses quantitatives : rugosité, contraintes résiduelles, résistance ultime, limite élastique et résistance à la rupture à la traction.

Les facteurs sont :

- qualitatifs : matériau, mode de lubrification;
- quantitatifs : avance, rayon du bec de l'outil.

2.4.3 Modèles de prédiction

Avec un plan d'expériences et pour des raisons économiques entre autres, on cherche à minimiser le nombre d'expériences effectué cherchant la solution au problème posé initialement, et ce en reliant les facteurs aux réponses par des relations mathématiques et statistiques.

Un modèle de régression multiple a été adopté pour les différents modèles mathématiques proposés pour chacune des réponses (variable expliquée Yi) en fonction des facteurs (variables explicatives Xi). En se basant sur l'hypothèse que toutes les variables indépendantes sont mesurables, les réponses du système Yi s'écriront sous la forme suivante:

$$Yi = f(X1, X2, X3, X4) \tag{2.2}$$

$$Yi = \varepsilon + \sum_{1}^{4} a_i X_i + \sum_{i=1}^{4} a_{ii} {X_i}^2 + \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} a_{ij} X_i X_j + a_0 \tag{2.3}$$

Avec X_i avec i∈[1,4], (Puertas Arbizu et Luis Perez, 2003) les facteurs indépendants à savoir dans l'ordre le matériau, le mode de lubrification, le rayon du bec de l'outil et l'avance par tour et X_j avec j∈ [1,4] les interactions entre les facteurs.

Avec :

Y_i : variable expliquée i;

X_i : variable explicative i;

X_i X_j : interaction entre les variables explicatives;

a_i : effet de la variable i;

a_{ii}: effet du terme quadratique relatif à i;

a_{ij} : effet de l'interaction entre i et j;

ε : terme d'erreurs non observables du modèle.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.4.4 Analyse des résultats

L'analyse des résultats consiste en une analyse de la variance (ANOVA) permettant de vérifier le degré de corrélation entre le modèle proposé liant la variable endogène Y_i à expliquer et les variables exogènes X_i, et les résultats par R^2 (coefficient de détermination).

R^2 donne une idée du pourcentage de variabilité de chaque réponse expliquée par les variables entrantes. Plus ce coefficient en pourcentage est proche de 100%, meilleur est le modèle.

Des transformations sur une ou plusieurs variables du modèle peuvent avoir lieu afin de satisfaire les hypothèses et les facteurs et interactions non significatifs, c'est-à-dire pas influents sur les réponses, sont éliminés.

L'homogénéité des variances et la normalité des résidus sont vérifiées. Une fois que toutes les hypothèses permettant d'avoir un modèle adéquat sont satisfaites, on aboutit au modèle de prédiction escompté.

Finalement, une optimisation des réponses dans le domaine expérimental est suggérée.

2.4.5 Validation du modèle

Le choix du modèle adéquat et sa validation reposent sur les hypothèses suivantes que l'on doit absolument vérifier afin d'aboutir au modèle escompté. Il faut tout d'abord vérifier la linéarité du modèle qui est l'hypothèse principale pour un modèle de régression. Il faut aussi s'assurer du fait que la variance des erreurs est constante quelle que soit l'observation et que les erreurs sont indépendantes et distribuées selon une loi normale centrée. Ces erreurs sont estimées par les résidus e_i (différence entre les valeurs observées et les valeurs prévues). Pour valider le modèle, il faut alors faire une analyse des résidus qui consiste à vérifier si les hypothèses de variance constante, d'indépendance et de normalité des erreurs sont satisfaites. Une analyse graphique des résidus en fonction des valeurs estimées et en fonction des

données relatives aux variables explicatives permettra de vérifier ces hypothèses et, par la suite, permettra de valider le modèle empirique. En bref, si on veut vérifier la validation du modèle proposée, il faut vérifier la linéarité du modèle, le fait que la variance des erreurs est constante quelle que soit l'observation. Encore, il faudra vérifier l'indépendance des erreurs et leur normalité.

Une optimisation individuelle et multi réponses seront proposés pour la rugosité arithmétique de surface R_a et pour les contraintes résiduelles σ_s dans cette étude.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la démarche expérimentale adoptée lors de cette étude, ainsi que le matériel et les méthodes utilisées pour la collecte et le traitement des données basées sur la stratégie des plans d'expériences. Le prochain chapitre traite les effets des conditions de coupe et des modes de lubrification sur les paramètres de rugosité de surface.

CHAPITRE 3

ÉTAT DE SURFACE

3.1 Introduction

Dépendamment des méthodes d'usinage, des matériaux et des outils de coupe utilisés, une surface usinée ne présente pas nécessairement une surface parfaitement lisse répondant exactement au dessin de définition. Des irrégularités géométriques peuvent survenir selon différents degrés d'importance. Ces irrégularités, pouvant avoir un impact important quant à la performance des pièces et leur durée de vie, sont définies par rapport à une ligne moyenne et la notion de rugosité est alors définie afin de caractériser l'intégrité de surface d'un point de vue géométrique. Il a été démontré dans plusieurs études que l'état de surface des pièces usinées dépend de plusieurs paramètres, principalement le rayon du bec de l'outil R_{ε}, la vitesse d'avance f et le mode de lubrification entre autres (Kouam et al., 2012), (Sreejith, 2008), (Davim, 2003), (Neşeli et al., 2011).

3.2 Définition des paramètres de rugosité

Dans cette étude et dans le but de quantifier la qualité de l'état de surface, nous avons choisi d'étudier les paramètres suivants :

- R_a : Rugosité moyenne arithmétique;
- R_q : Écart quadratique moyen de rugosité;
- R_v : Profondeur maximale de profil;
- R_c : Hauteur moyenne des éléments de profil;
- R_{sm} : Largeur moyenne des éléments du profil;
- R_k : Profondeur de base de rugosité.

Dans ce qui suit, les définitions relatives à chacun des paramètres de rugosité retenus pour cette étude seront présentés (figure 3.1).

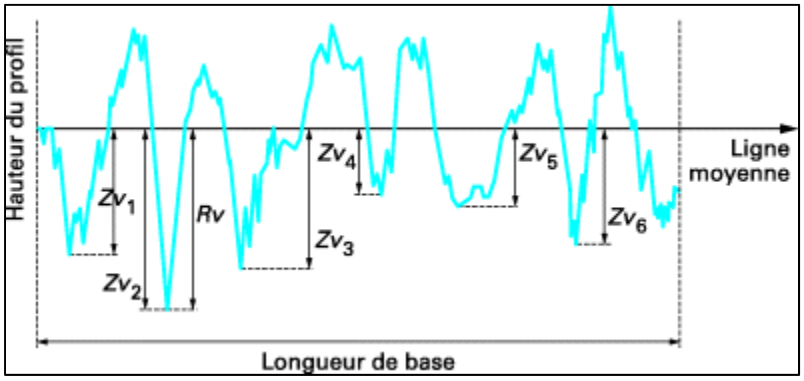
R_a : moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées *Z (x)* à l'intérieur d'une longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|\, dx$$

R_q : moyenne quadratique des valeurs des ordonnées *Z (x),* à l'intérieur d'une longueur de base.

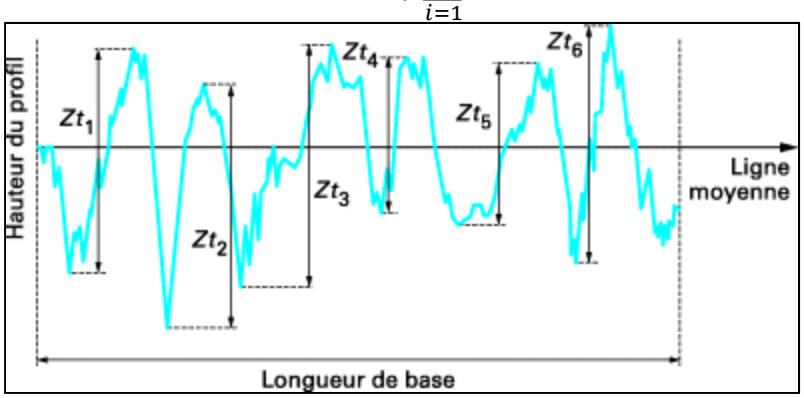
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l Z^2(x)\, dx}$$

R_v : plus grande des profondeurs de creux du profil, *Zv,* à l'intérieur d'une longueur de base.



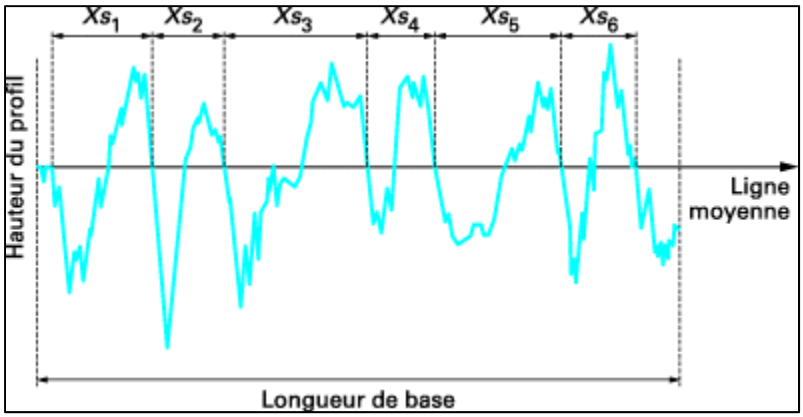
R_c : valeur moyenne des hauteurs des éléments du profil, *Zt,* à l'intérieur d'une longueur de base.

$$R_c = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Z_{t_i}$$



R_{sm} : valeur moyenne des largeurs des éléments du profil *Xs,* à l'intérieur d'une longueur de base.

$$R_{sm} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} X_{s_i}$$



R_k : Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité.

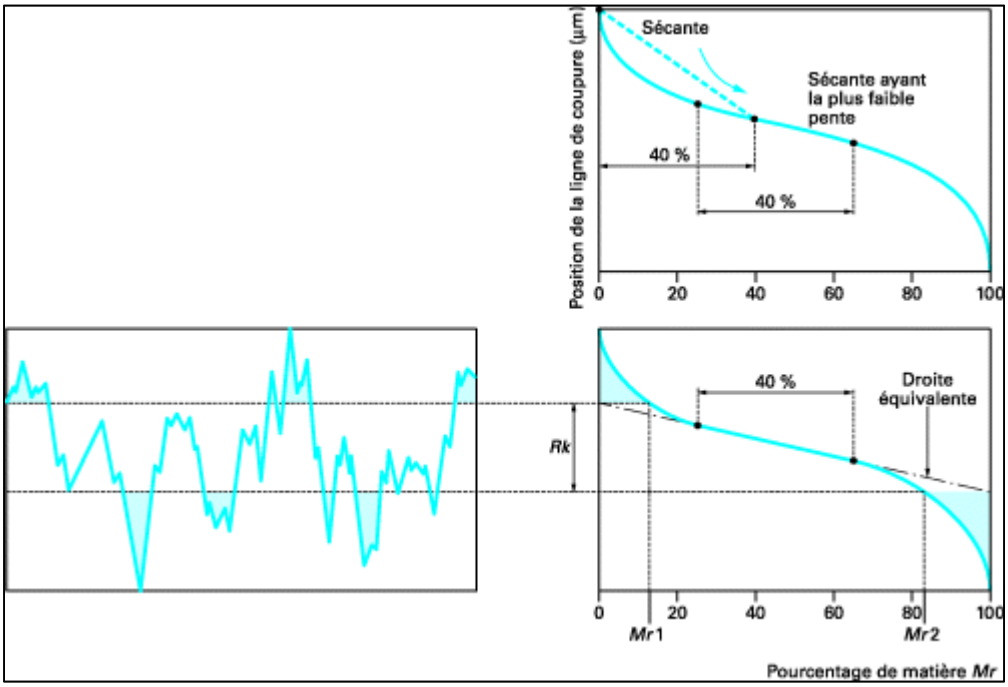


Figure 3.1 Définitions des paramètres de rugosité de surface
(Tirée de http//www.techniques-ingenieur.fr)

Les données relatives aux différents paramètres de rugosité de surface collectées sont regroupées en matrice dans l'annexe I.

3.3 Résultats et analyse

3.3.1 Exemples de profils de rugosité de surface

Les figures 3.2 et 3.3 présentent quelques exemples de profils de rugosité de surface de quelques échantillons usinés sous différentes conditions de coupe pour le matériau 2024-T4 et ce, parallèlement à la vitesse d'avance.

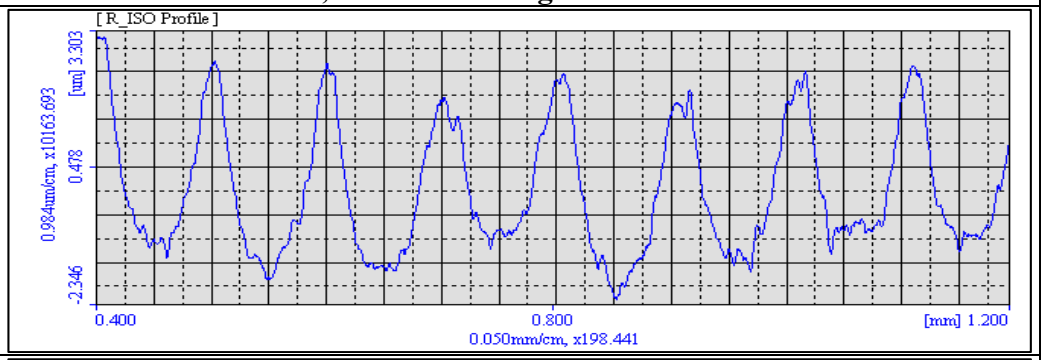
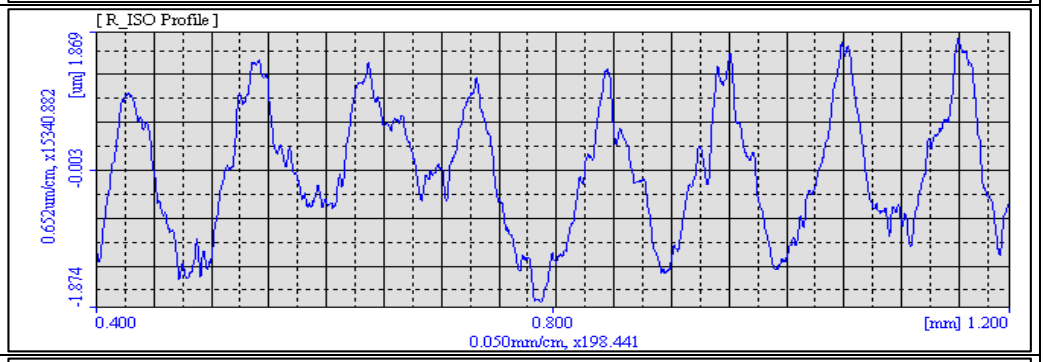
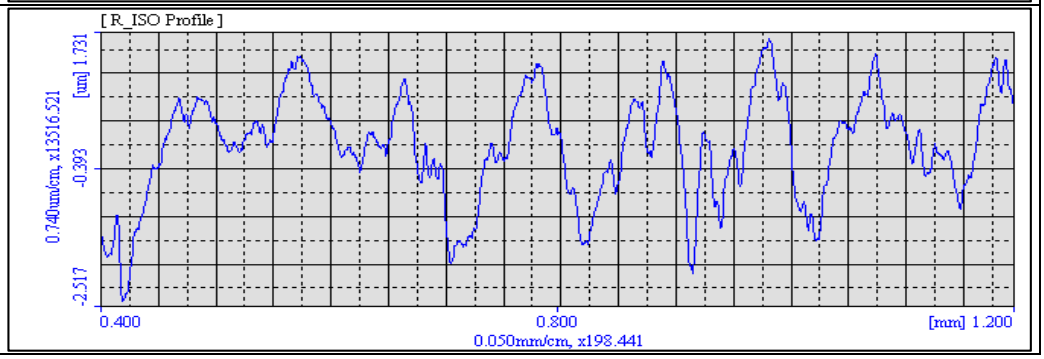
Rε (mm)	f=0,10mm/tr-Usinage à sec-2024-T4
0,2	
0,4	
0,8	

Figure 3.2 Exemples de profils de rugosité de surface pour le 2024-T4 pour une vitesse d'avance de 0,10mm/tr en usinage à sec

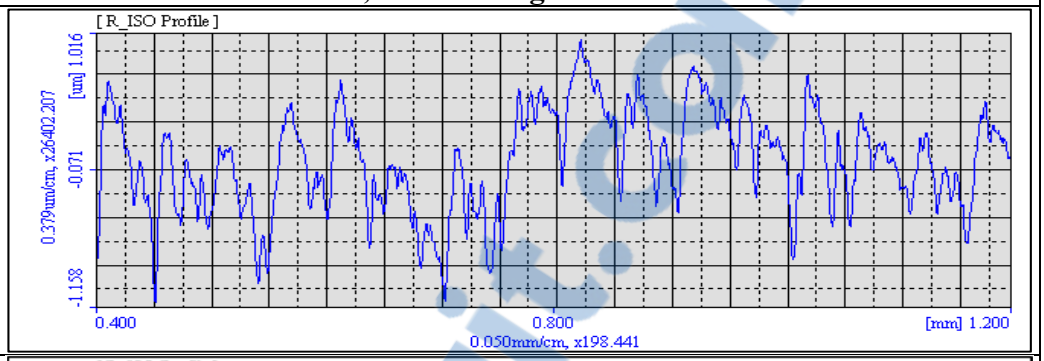
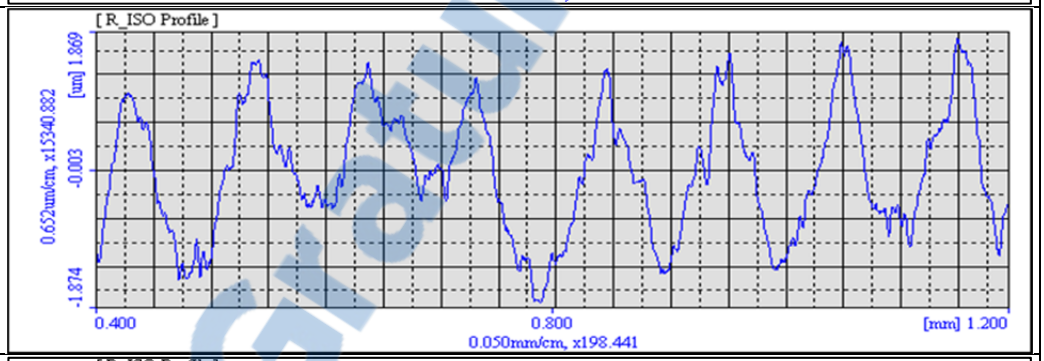
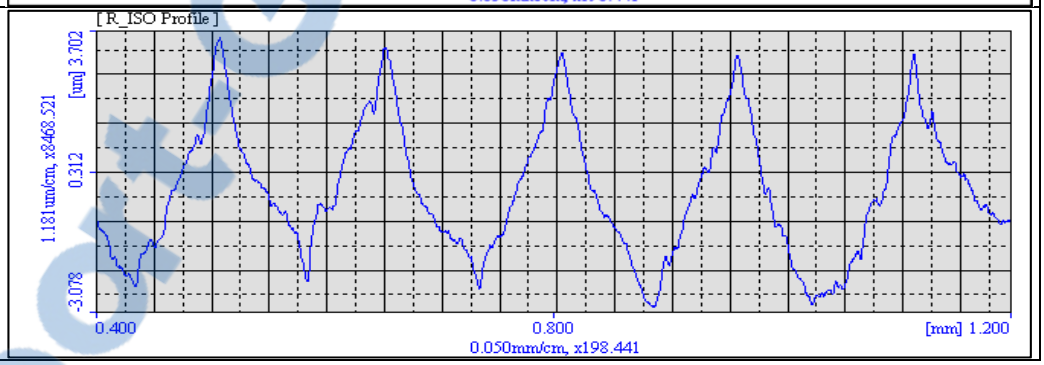
f (mm/tr)	Rε =0,4mm-Usinage à sec-2024-T4
0,05	
0,10	
0,15	

Figure 3.3 Exemples de profils de rugosité de surface pour le 2024-T4 pour un rayon de bec de l'outil de 0,4mm en usinage à sec

Les exemples de profils de rugosité de surface 2D proposés dans les figures 3.2 et 3.3 présentent la série des coordonnées en X et Y décrivant d'une part le mouvement que le stylet du profilomètre balaye lors de la prise des mesures parallèlement à l'avance sur les éprouvettes usinées, et d'autre part les dénivellations de la surface observées sur une courte longueur.

Rapport-Gratuit.com

Dans la suite, une analyse à la fois qualitative et quantitative est effectuée afin d'étudier les effets des conditions de coupe sur la topographie de surface décrite par les paramètres de rugosité de surface définis dans la figure 3.1.

3.3.2 Facteurs à effets significatifs sur les paramètres de rugosité

Dans cette partie, nous allons visualiser l'influence des facteurs sur les réponses à travers une analyse des graphiques de Pareto qui permettent de classer les facteurs et leurs interactions selon leur degré de contribution dans les réponses, et ce par ordre décroissant.

Cette analyse Pareto permet de voir les facteurs et interactions significatifs sur les réponses, avec un niveau de confiance de 95%. On remarque bien, d'après ces graphiques Pareto (figure 3.4), que seuls l'avance par tour, le rayon du bec de l'outil, leurs interactions et actions quadratiques ont des effets significatifs sur les réponses. Les autres paramètres seront éliminés dans la suite de notre étude comme facteurs significatifs, et ce en subdivisant notre plan principal en sous plans prenant en considération un facteur qualitatif, qui est non significatif et qui sera ainsi fixé à un seul niveau à chaque fois. Encore et comme on cherche à mettre en évidence les différences que peuvent prendre les réponses pour les trois matériaux et les modes de lubrification étudiés, on optera dans la suite pour une étude qui tient compte de chaque niveau de matériau et de chaque niveau de mode de lubrification à part, et ce lors de la modélisation des paramètres de rugosité aussi.

Les coefficients de déterminations R^2 de l'analyse ANOVA sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Coefficients de détermination suite à l'analyse ANOVA

Grandeurs caractéristiques	**Ra**	**Rq**	**Rv**	**Rc**	**Rsm**	**Rk**
R^2 (%)	95,03	95,01	78,25	95,32	72,98	67,03
$R^2_{ajusté}$ (%)	94,28	94,27	74,99	94,62	68,93	62,08

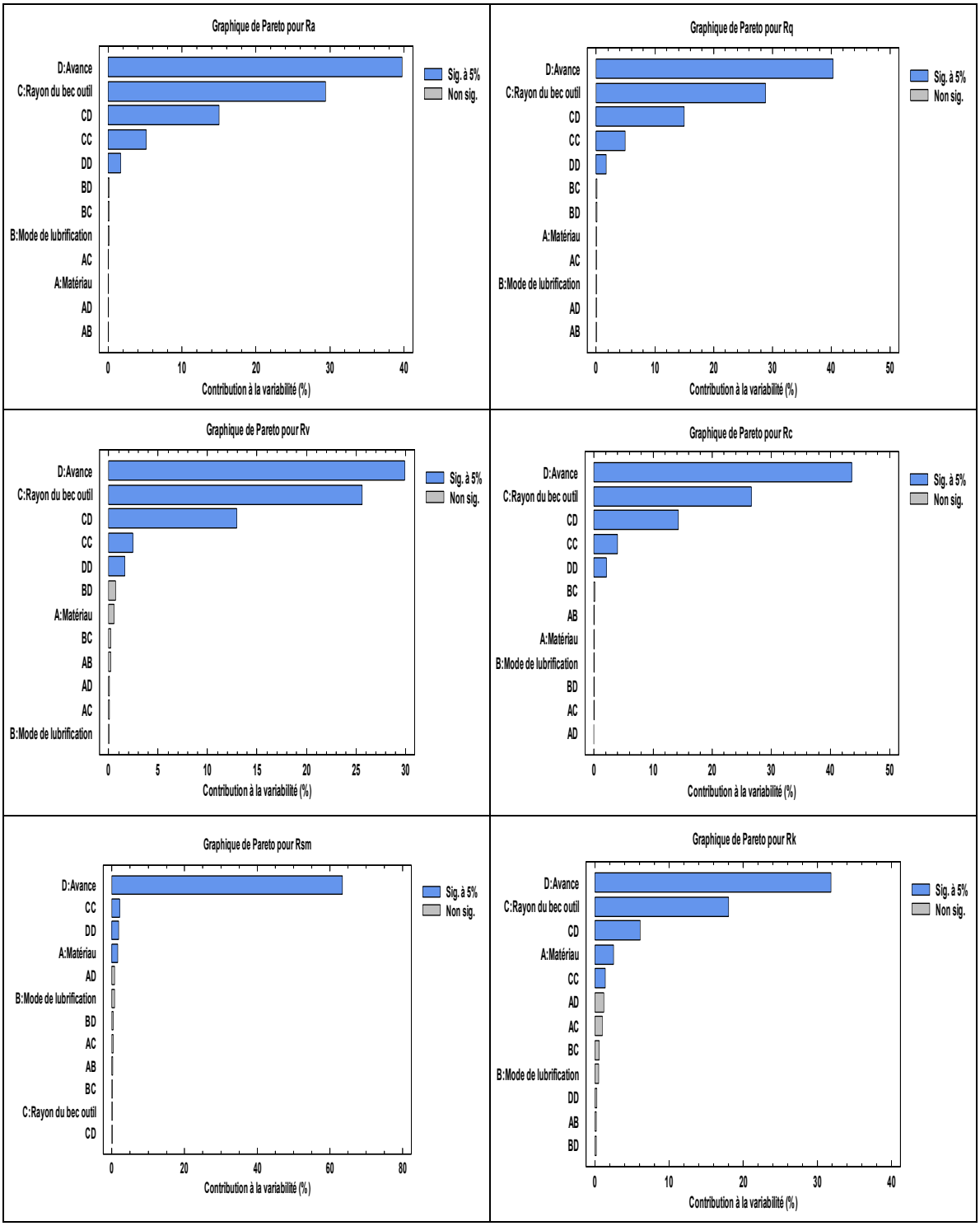


Figure 3.4 Graphiques de Pareto complets pour les paramètres de Rugosité

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

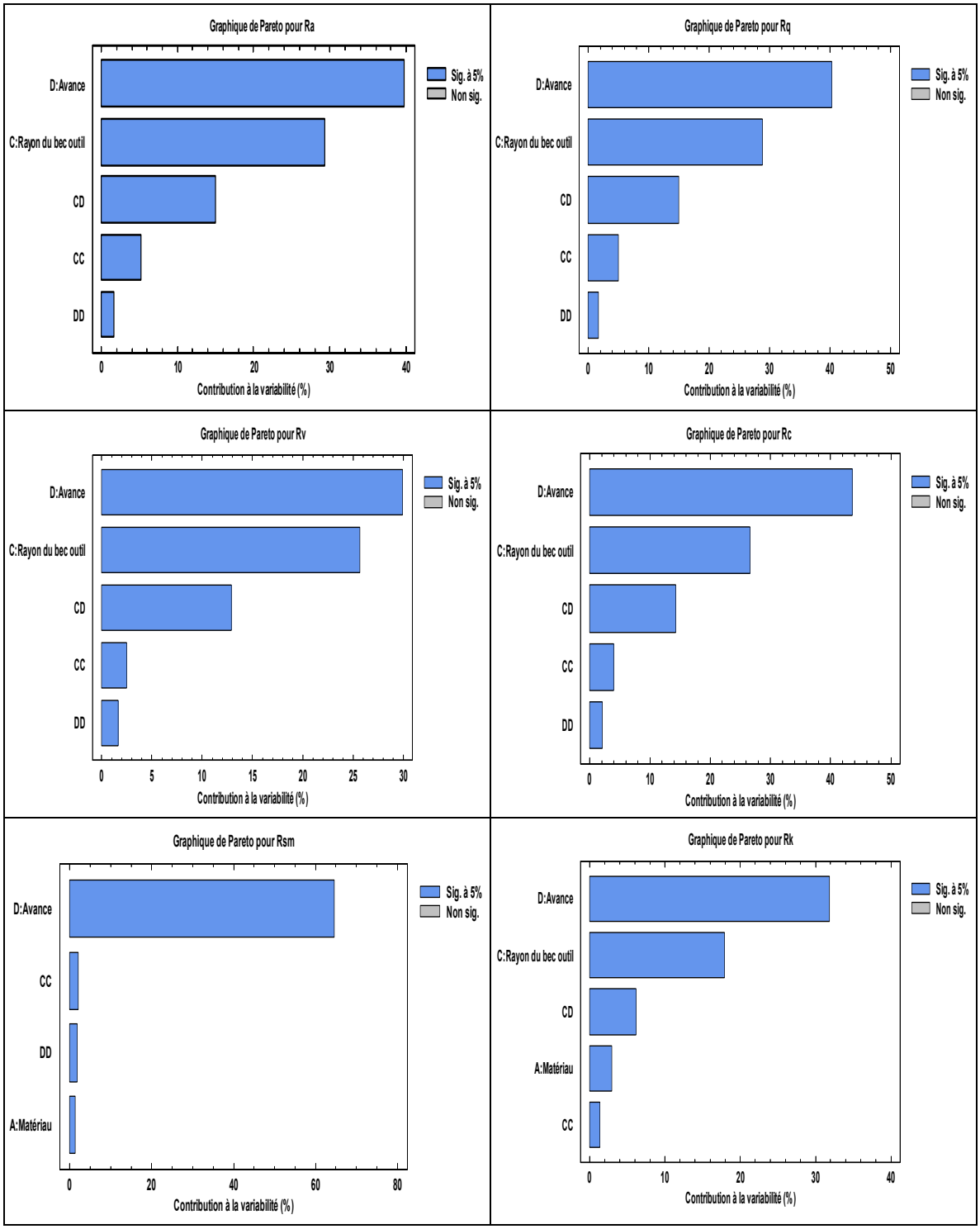


Figure 3.5 Graphiques de Pareto pour les paramètres de Rugosité après élimination des facteurs non significatifs

La figure 3.5 illustre les graphiques de Pareto pour les six paramètres de rugosité après éliminations des facteurs non significatifs. Majoritairement, c'est l'avance et le rayon du bec de l'outil qui sont les facteurs les plus influents. Néanmoins et pour le paramètre de rugosité R_{sm}, nous remarquons que le matériau influe légèrement sur ce dernier.

Le tableau 3.2 illustre les coefficients de détermination suite à une analyse ANOVA après l'élimination des facteurs à influence non significative.

Tableau 3.2 Coefficients de détermination suite à l'analyse ANOVA
après suppression des facteurs non significatifs

Grandeurs caractéristiques	**Ra**	**Rq**	**Rv**	**Rc**	**Rsm**	**Rk**
R^2 (%)	94,64	94,61	76,45	94,96	70,73	63,32
$R^2_{ajusté}$ (%)	94,42	94,44	75,93	94,80	69,79	61,90

Avec :

R^2 Coefficient de détermination ou coefficient de corrélation du modèle compris entre 0 et 1. C'est le coefficient de variabilité du modèle. Plus il est proche de 1, meilleur est le modèle.

$R^2_{ajusté}$ C'est la correction de R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables dans le modèle.

3.3.3 Étude des interactions et des effets principaux

Dans un premier temps, nous allons étudier les effets principaux des 4 facteurs, à savoir le matériau, le rayon du bec de l'outil, la vitesse d'avance et le mode de lubrification (figure 3.6).

L'usage des unités réelles s'avère commode pour donner immédiatement un aperçu sur les valeurs de comparaison des effets.

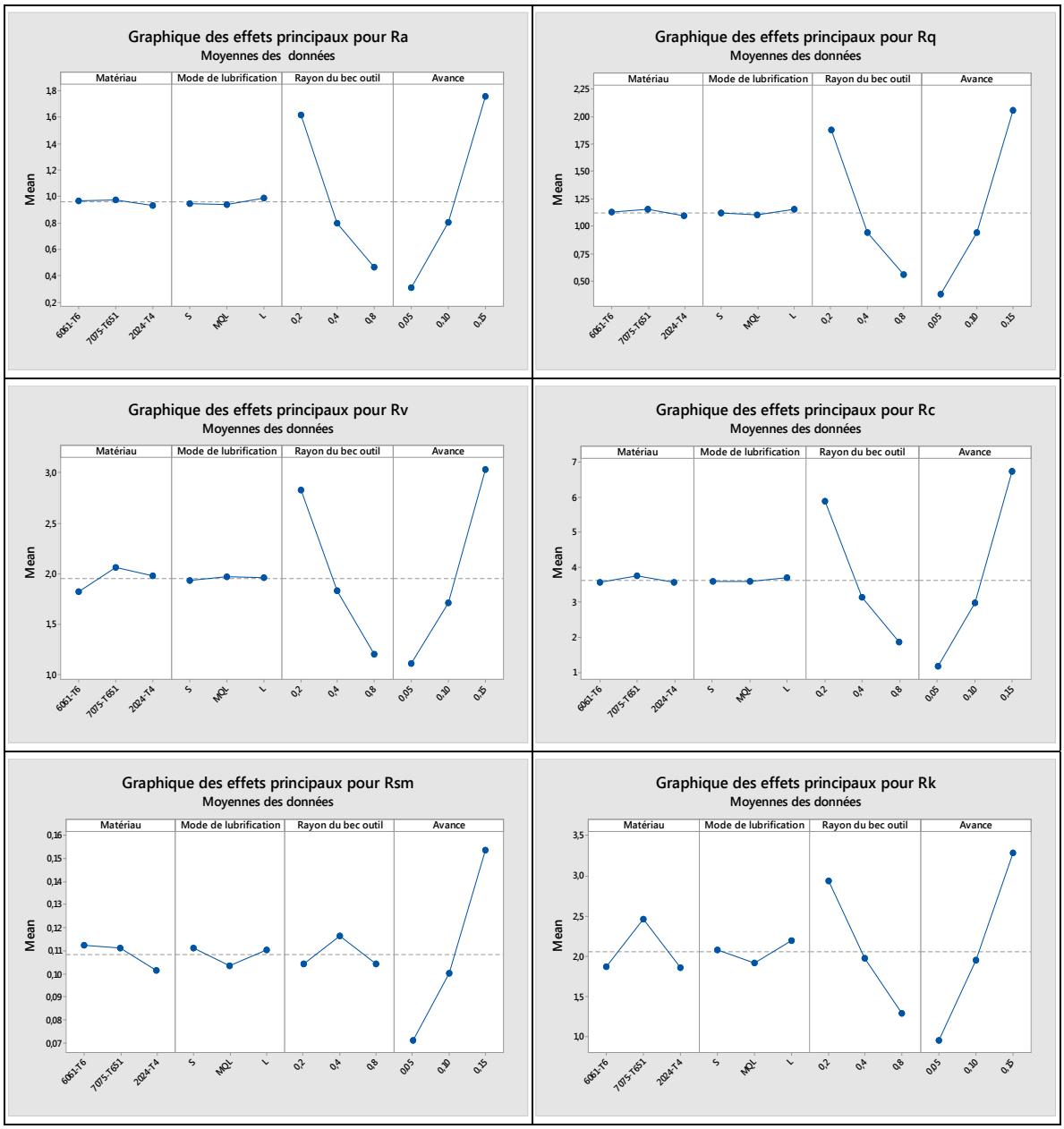


Figure 3.6 Graphiques des effets principaux pour les paramètres de rugosité

Les effets principaux sont directement influencés par les paramètres d'usinage. D'après les graphiques des effets principaux, on constate que l'action du rayon du bec de l'outil et celle de la vitesse d'avance sont les plus importantes, sauf pour R_{sm}, sur lequel le rayon du bec de l'outil présente une faible influence avec une tendance quadratique.

Pour le restant des facteurs, on constate que le matériau et le mode de lubrification ont un effet négligeable sur les paramètres R_a , R_q et R_c, et un léger effet sur R_v, R_{sm} et R_k. À ce stade, on aboutit au fait que la vitesse d'avance est le facteur le plus influent, plus elle augmente et plus les valeurs des paramètres de rugosité augmentent. En deuxième position, on trouve le rayon du bec de l'outil qui, plus il augmente et moins sont les valeurs des paramètres de rugosité. En dernière position, on trouve le mode de lubrification et le matériau qui n'ont quasiment pas d'effets significatifs sur les réponses. Cependant, en voyant de près les différences aperçues dans les graphiques des effets principaux, nous constatons que, du point de vue matériau, le 2024-T4 présente majoritairement les plus faibles valeurs de la rugosité, suivi du 6061-T6 et finalement du 7075-T651. Pour ce qui est du mode de lubrification, on voit aussi une légère variation. La micro-lubrification, ou MQL, présente les valeurs les plus faibles de la rugosité, suivie du mode S et ensuite du mode L.

Afin d'avoir une interprétation complète, il faut tenir compte des interactions qui, nous l'avons vu dans les analyses Pareto, ne sont pas négligeables. Encore, la présence d'interactions entre les facteurs, ne permet pas d'étudier l'influence d'un facteur à partir de son effet principal seul sur une réponse car lorsqu'on change son niveau, on modifie les effets de tous les autres facteurs. Une analyse basée uniquement sur les effets principaux des différents facteurs serait alors une source d'erreur, d'où l'importance de la considération des interactions lors de l'étude des influences pour aboutir aux interprétations.

Les effets des interactions entre les facteurs sont illustrés dans la figure 3.7 pour le paramètre R_a et dans l'annexe II pour le reste des paramètres de rugosité. D'après ces figures, nous constatons que nos facteurs qualitatifs n'ont pratiquement pas d'effet sur les paramètres de rugosité en interagissant avec les autres facteurs. Ces paramètres se comportent de manière semblable pour tous les matériaux et les modes de lubrification qui possèdent une influence négligeable, contrairement à la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil qui influent sur les réponses d'une façon significative et directe, et en interagissant l'un avec l'autre.

Nous constatons aussi que, plus l'avance augmente, et ce pour les différents niveaux du reste des facteurs, plus la valeur des réponses augmentent. Pour ce qui est du rayon du bec de l'outil, nous remarquons que plus le rayon diminue, plus la rugosité de surface augmente pour tous les paramètres, sauf pour le R_{sm} pour lequel on voit, d'après le diagramme des effets directs, que le rayon du bec n'a pratiquement pas d'influence sur lui.

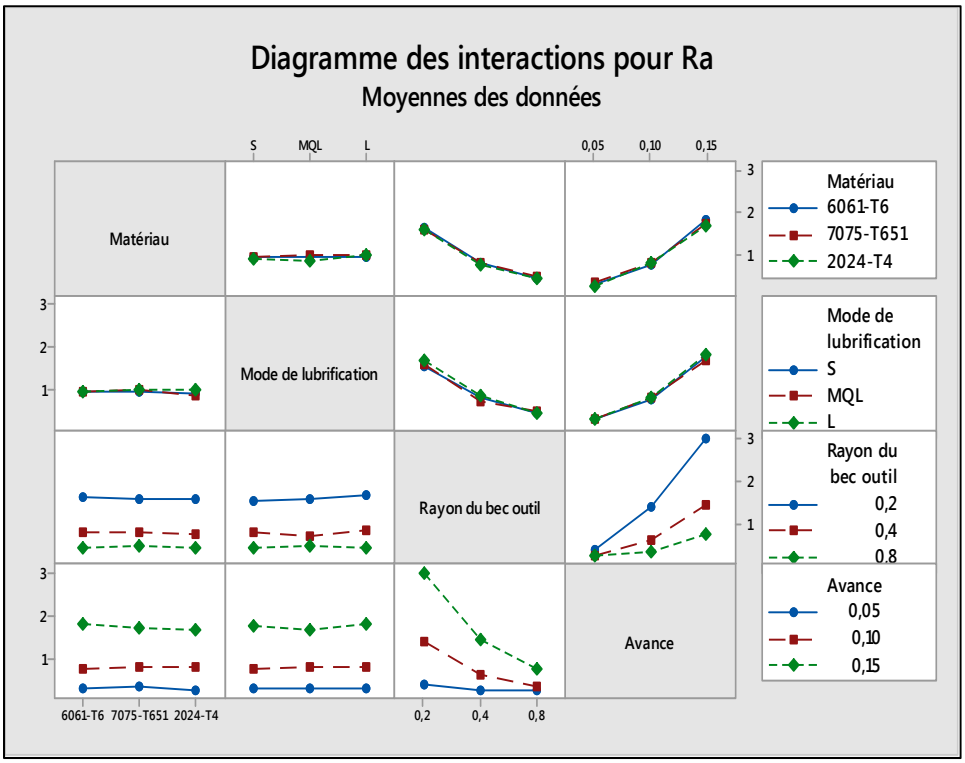


Figure 3.7 Effets des interactions sur Ra

Ces graphiques (figures 3.6 et 3.7) viennent confirmer ce qui a été observé dans les graphiques de Pareto.

Dans la suite de ce travail, nous allons investiguer les effets des facteurs quantitatifs retenus comme facteurs ayant des effets significatifs sur les réponses en vue de modélisation de chaque comportement de réponse en fonction de chaque mode de lubrification.

3.3.4 Étude des paramètres de rugosité

Le graphique des effets directs pour le 2024-T4 (figure 3.8) présente le même résultat que celui constaté dans ce qui précède avec la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil comme facteurs les plus influents et le mode de lubrification qui n'influe pratiquement pas sur la réponse. La lubrification à quantité minimale présente légèrement les plus faibles valeurs. Le même comportement est observé pour le reste des paramètres de rugosité et ceci est valable pour les trois matériaux étudiés. On optera alors pour les graphiques des figures 3.6 et 3.7 et celles de l'annexe II pour qualifier les effets directs et interactions dans le reste de cette section pour le 2024-T4, le 6061-T6 et le 7075-T4.

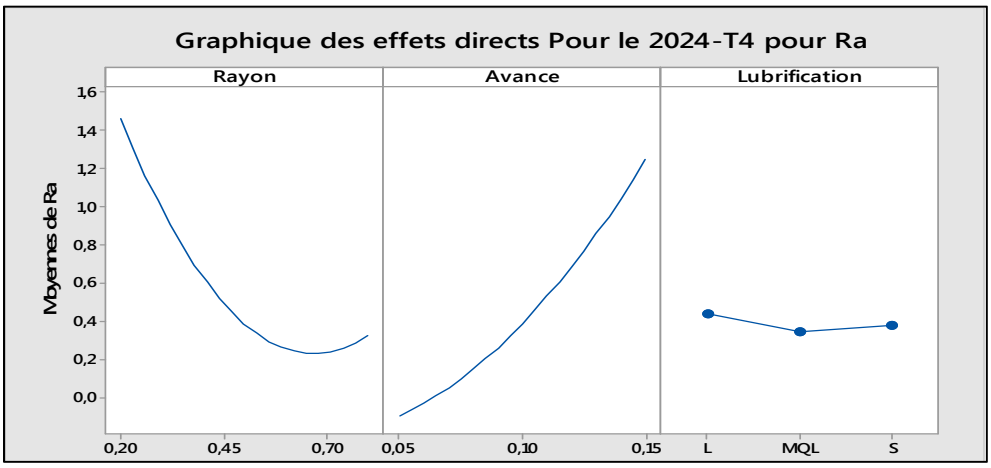


Figure 3.8 Graphique des effets directs pour Ra pour le 2024-T4

La figure 3.9 nous permet d'estimer la contribution de chaque facteur significatif retenu après élimination des facteurs et/ou interactions non significatifs sur les paramètres de rugosité avec un niveau de confiance de 95%, et ce en les classant par ordre décroissant. Seuls les paramètres significatifs figureront dans le modèle de prédiction. Nous constatons un taux de variabilité supérieur à 90% pour la majorité des paramètres ce qui est un taux satisfaisant expliquant plus de 90% de variabilité du système sauf pour le paramètre R_k de coefficient de détermination faible. La figure 3.9 illustre également les mêmes effets principaux pour le 2024-T4 usiné à sec. La lubrification n'a pas d'effet significatif et la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance et diminue avec l'augmentation du rayon de l'outil.

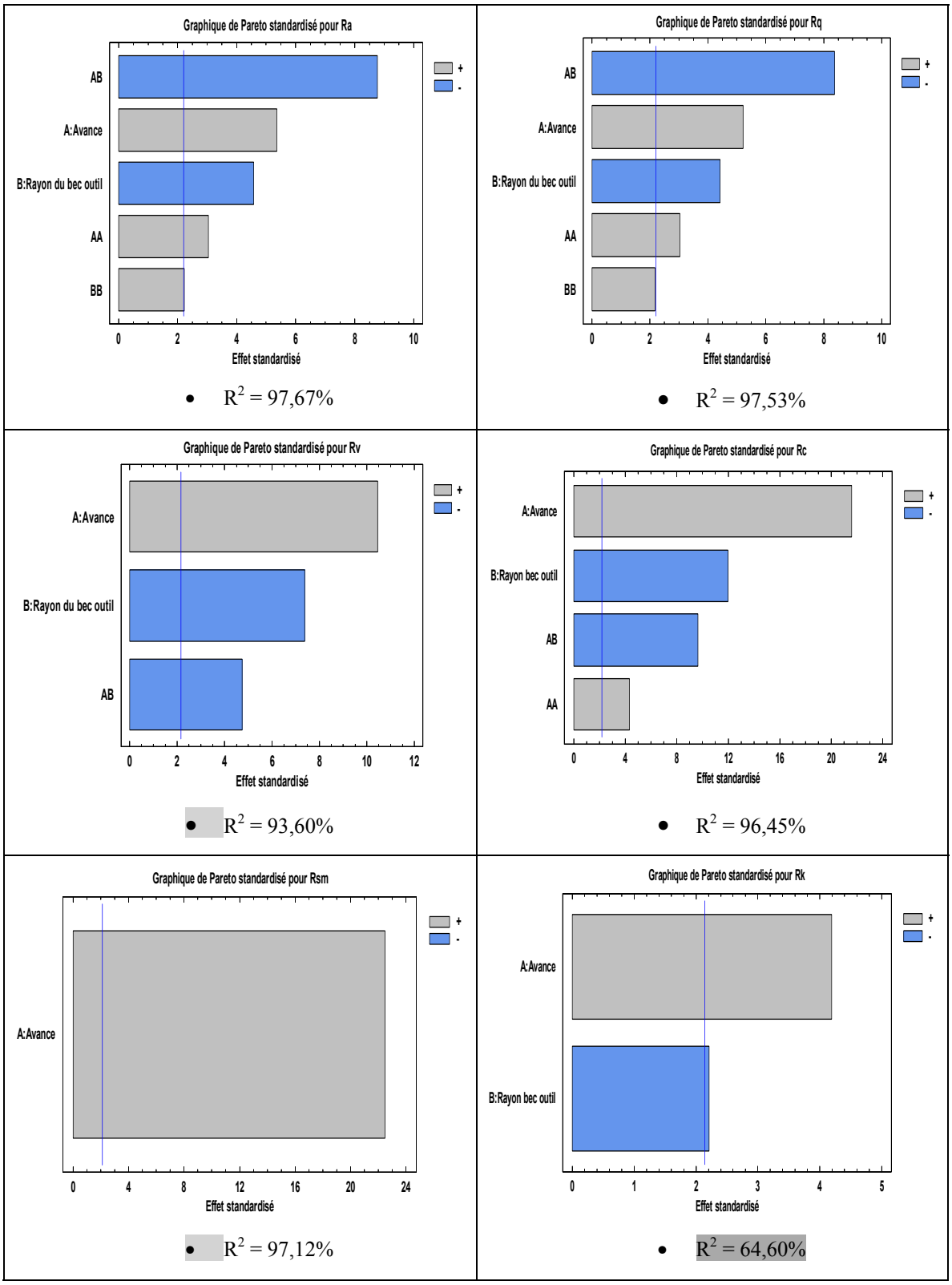


Figure 3.9 Graphiques de Pareto pour les paramètres de rugosité du 2024-T4 à sec

L'homogénéité de la variance est vérifiée à travers la figure 3.10 comparant les valeurs observées avec les valeurs prédites. Dans notre cas, les points sont répartis de part et d'autre de la droite oblique, cette droite qui explique que, si les points se trouvent directement sur la droite, le modèle de prédiction coïncide parfaitement avec le comportement observé. Mais ceci n'est pas possible vu l'influence que peut avoir le bruit, qui est toujours présent mais à certains degrés, dépendamment du mécanisme. On cherchera alors à voir le maximum de points de part et d'autre de la droite oblique et qui ne cherchent pas à s'éloigner. La figure 3.10 prouve que l'homogénéité de la variance est vérifiée pour le paramètre Ra qui a présenté la même variation entre les valeurs réelles et prédites pour le reste des paramètres de rugosité. Cette homogénéité de la variance a été vérifiée pour les autres paramètres de rugosité investigués.

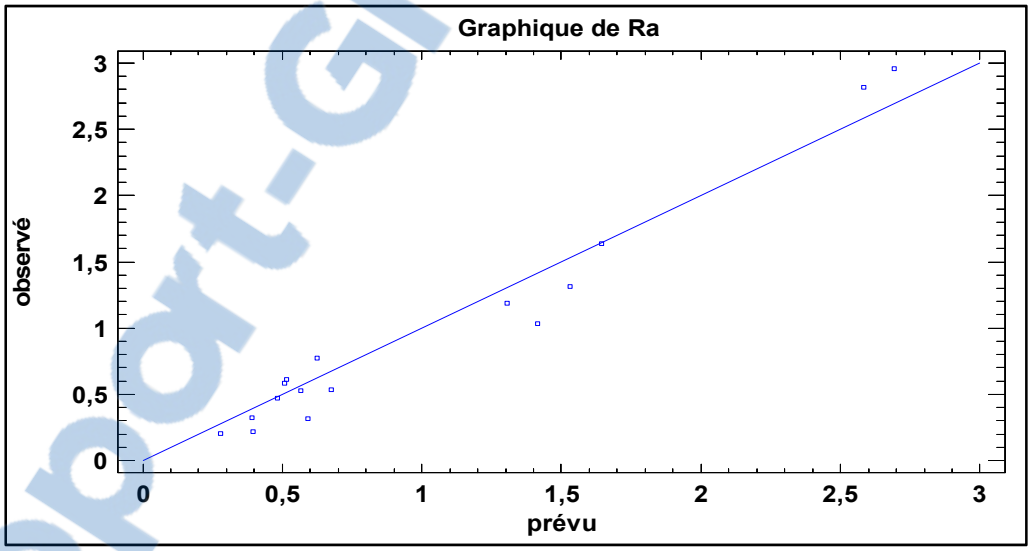


Figure 3.10 Graphique de comparaison entre les valeurs observées et prévues de Ra

La figure 3.11 montre que la normalité des résidus, condition essentielle quant à la validation des modèles proposés, est vérifiée même si quelques points se détachent de la courbe de normalité, présentant les points aberrants.

Rapport-Gratuit.com

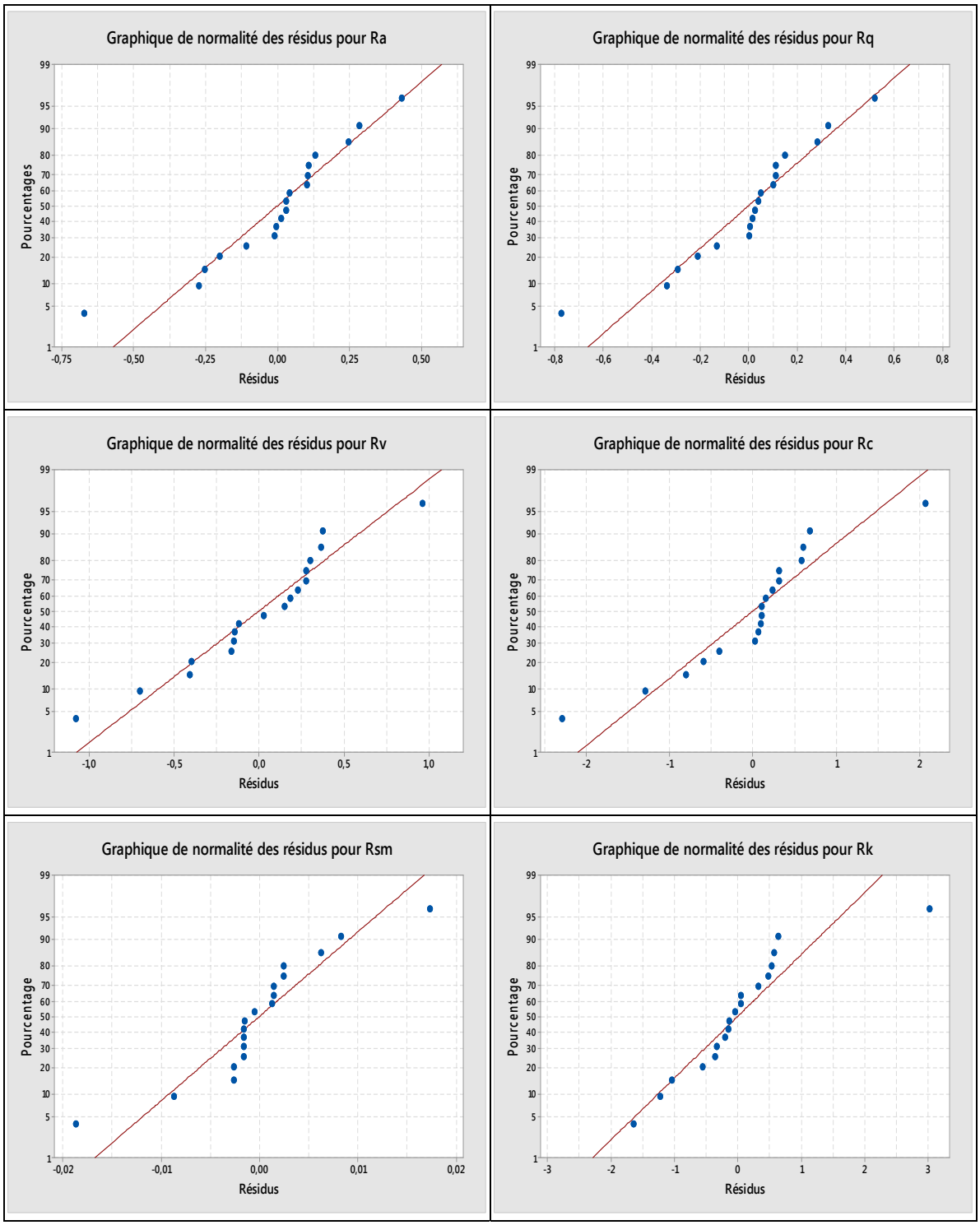


Figure 3.11 Graphiques de normalité des résidus pour le 2024-T4 usiné à sec

3.3.5 Modélisation des équations de prédiction et surfaces de réponse

Les modèles de prédiction des paramètres de rugosité auxquels cette étude a abouti suite à une étude statistique, pour chaque matériau en fonction des modes de lubrification, sont présentés dans les tableaux 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 et 3.8 pour R_a, R_q, R_v, R_c, R_{sm} et R_k respectivement.

Avec :

- $f \in [0.05, 0.15]$[mm/tr];
- $R_\varepsilon \in [0.2, 0.8]$[mm].

Tableau 3.3 Équations de prédiction des Ra

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	S	$Ra = -0{,}228472 + 12{,}1425 * f - 0{,}330556 * R_\varepsilon + 99{,}7 * f^2 - 33{,}875 * f * R_\varepsilon + 2{,}025 * {R_\varepsilon}^2$	97,67
	MQL	$Ra = 0{,}418 + 27{,}225 * f - 6{,}12625\, R_\varepsilon * -31{,}1 * f * R_\varepsilon + 7{,}34375 * {R_\varepsilon}^2$	93,33
	L	$Ra = -0{,}442194 + 29{,}7025 * f - 2{,}96804 * R_\varepsilon - 31{,}1946 * f * R_\varepsilon + 4{,}39444 * {R_\varepsilon}^2$	93,76
6061-T6	S	$Ra = 0{,}929722 + 3{,}25833 * f - 3{,}79345 * R_\varepsilon + 135{,}233 * f^2 - 31{,}6071 * f * R_\varepsilon + 4{,}96389 * {R_\varepsilon}^2$	94,33
	MQL	$Ra = 0{,}807917 + 10{,}3192 * f - 4{,}65976 * R + 103{,}067 * f^2 - 34{,}6482 * f * R_\varepsilon + 6{,}05764 * {R_\varepsilon}^2$	96,72
	L	$Ra = 0{,}844306 + 7{,}52083 * f - 4{,}09863 * R_\varepsilon + 114{,}633 * f^2 - 33{,}3554 * f * R_\varepsilon + 5{,}36389 * {R_\varepsilon}^2$	96,12
7075-T651	S	$Ra = -0{,}23375 + 28{,}7175 * f - 3{,}30863 * R_\varepsilon - 31{,}8304 * f * R_\varepsilon + 4{,}75833 * {R_\varepsilon}^2$	95,19
	MQL	$Ra = -0{,}23375 + 28{,}7175 * f - 3{,}30863 * R_\varepsilon - 31{,}8304 * f * R_\varepsilon + 4{,}75833 * {R_\varepsilon}^2$	90,92
	L	$Ra = 0{,}599 - 3{,}55\, R_\varepsilon + 11{,}02 f + 5{,}09 {R_\varepsilon}^2 + 101{,}8\, f^2 - 35{,}43\, R_\varepsilon * f$	96,80

Par la même méthode, des modèles multiplicatifs peuvent aussi être obtenus pour Ra et le reste des paramètres de rugosité. Cependant, ces modèles ont présenté des coefficients de détermination R^2 moins bons que les modèles additifs. Tel est le cas de la rugosité

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

arithmétique, qui peut être modélisée par l'équation multiplicative suivante avec un coefficient de détermination de 86,73%.

$$Ra = 10{,}89 \frac{f^{1{,}47}}{{R_\varepsilon}^{0{,}79}} \tag{3.1}$$

La même constatation a été faite pour le reste des paramètres de rugosité quant aux modèles additifs et multiplicatifs.

Tableau 3.4 Équations de prédiction des Rq

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	S	$Rq = -0{,}195667 + 13{,}0933 * f - 0{,}44 * R_\varepsilon + 117{,}2 * f^2 - 38{,}1 * f * R_\varepsilon + 2{,}33333 * {R_\varepsilon}^2$	97,53
	MQL	$Rq = 0{,}488917 + 31{,}5825 * f - 7{,}15095 * R_\varepsilon - 35{,}9696 * f * R_\varepsilon + 8{,}61458 * {R_\varepsilon}^2$	93,24
	L	$Rq = -0{,}463 + 33{,}74 * f - 3{,}45393 * R_\varepsilon - 34{,}8357 * f * R_\varepsilon + 5{,}02083 * {R_\varepsilon}^2$	93,39
6061-T6	S	$Rq = 1{,}05189 + 4{,}29833 * f - 4{,}20381 * R_\varepsilon + 152{,}233 * f^2 - 36{,}1786 * f * R_\varepsilon + 5{,}51806 * {R_\varepsilon}^2$	94,53
	MQL	$Rq = 0{,}955833 + 10{,}7683 * f - 5{,}2606 * R + 125{,}133 * f^2 - 40{,}1607 * f * R_\varepsilon + 6{,}93611 * {R_\varepsilon}^2$	96,53
	L	$Rq = 0{,}914833 + 8{,}6 * f - 4{,}36536 * R_\varepsilon + 132{,}5 * f^2 - 38{,}4964 * f * R_\varepsilon + 5{,}85833 * {R_\varepsilon}^2$	95,49
7075-T651	S	$Rq = -0{,}256333 + 33{,}38 * f - 3{,}83643 * R_\varepsilon - 36{,}7357 * f * R_\varepsilon + 5{,}51667 * {R_\varepsilon}^2$	94,89
	MQL	$Rq = -0{,}0186944 + 33{,}9025 * f - 4{,}97565 * R_\varepsilon - 38{,}6768 * f * R_\varepsilon + 6{,}85278 * {R_\varepsilon}^2$	91,52
	L	$Rq = 0{,}606 - 3{,}84 R_\varepsilon + 13{,}83 * f + 5{,}65 * {R_\varepsilon}^2 + 112{,}1 * f^2 - 41{,}07 R_\varepsilon * f$	96,94

Tableau 3.5 Équations de prédiction des Rv

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	S	$Rv = -1{,}16431 + 44{,}0858 * f + 1{,}54972 * R_\varepsilon - 42{,}4083 * f * R_\varepsilon$	93,60
	MQL	$Rv = 0{,}234278 + 41{,}055 * f - 5{,}14613 * R_\varepsilon - 38{,}942 * f * R_\varepsilon + 6{,}34931 * {R_\varepsilon}^2$	92,99
	L	$Rv = 0{,}234278 + 41{,}055 * f - 5{,}14613 * R_\varepsilon - 38{,}9429 * f * R_\varepsilon + 6{,}34931 * {R_\varepsilon}^2$	92,99
6061-T6	S	$Rv = -0{,}435 + 34{,}6625 * f + 0{,}635357 * R_\varepsilon - 31{,}5304 * f * R_\varepsilon$	87,01
	MQL	$Rv = 0{,}189639 + 44{,}7875 * f - 5{,}79524 * R_\varepsilon - 54{,}5268 * f * R_\varepsilon + 8{,}34236 * {R_\varepsilon}^2$	92,67
	L	$Rv = 1{,}79742 + 12{,}3458 * f - 6{,}32935 * R_\varepsilon + 154{,}733 * f^2 - 49{,}5482 * f * R_\varepsilon + 8{,}11944 * {R_\varepsilon}^2$	95,48
7075-T651	S	$Rv = -0{,}665167 + 37{,}75 * f + 1{,}7756 * R_\varepsilon - 40{,}7286 * f * R_\varepsilon$	80,98
	MQL	$Rv = -1{,}51925 + 45{,}58 * f + 3{,}74423 * R_\varepsilon - 58{,}7357 * f * R_\varepsilon$	85,71
	L	$Rv = -1{,}770 + 3{,}39 R_\varepsilon + 51{,}51 f - 61{,}1 R_\varepsilon * f$	88,99

Tableau 3.6 Équations de prédiction des Rc

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	S	$Rc = -1{,}27161 + 25{,}0025 * f + 5{,}26389 * R_\varepsilon + 444{,}467 * f^2 - 110{,}825 * f * R_\varepsilon$	96,45
	MQL	$Rc = 1{,}20367 + 104{,}905 * f - 22{,}4189 * R_\varepsilon - 116{,}557 * f * R_\varepsilon + 27{,}2396 * {R_\varepsilon}^2$	95,44
	L	$Rc = 2{,}27 - 11{,}20 * R_\varepsilon + 16{,}4 * f + 15{,}42 * {R_\varepsilon}^2 + 444 f^2 - 100{,}3 * R_\varepsilon * f$	95,51
6061-T6	S	$Rc = 3{,}07439 + 10{,}7583 * f - 12{,}0786 * R_\varepsilon + 488{,}233 * f^2 - 109{,}293 * f * R_\varepsilon + 16{,}1743 * {R_\varepsilon}^2$	93,26
	MQL	$Rc = -0{,}683778 + 20{,}4258 * f + 5{,}30056 * R_\varepsilon + 488{,}233 * f^2 - 126{,}171 * f * R_\varepsilon + 18{,}9792 * {R_\varepsilon}^2$	95,10
	L	$Rc = 2{,}61647 + 18{,}0792 * f - 10{,}7312 * R_\varepsilon + 453{,}767 * f^2 - 117{,}009 * f * R_\varepsilon + 15{,}2938 * {R_\varepsilon}^2$	96,
7075-T651	S	$Rc = 1{,}47003 + 33{,}7392 * f - 9{,}76244 * R_\varepsilon + 384{,}867 * f^2 - 117{,}784 * f * R_\varepsilon + 15{,}4028 * {R_\varepsilon}^2$	95,85
	MQL	$Rc = 1{,}47003 + 33{,}7392 * f - 9{,}76244 * R_\varepsilon + 384{,}867 * f^2 - 117{,}784 * f * R_\varepsilon + 15{,}4028 * {R_\varepsilon}^2$	95,67
	L	$Rc = -4{,}74 + 5{,}97 R_\varepsilon + 117{,}1 f - 127{,}4 R_\varepsilon * f$	92,41

Tableau 3.7 Équations de prédiction des Rsm

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	**S**	$Rsm = 0{,}00977778 + 0{,}938333 * f$	97,12
	MQL	$Rsm = 0{,}00288889 + 0{,}953333 * f$	93,52
	L	$Rsm = 0{,}00977778 + 0{,}938333 * f$	97,12
6061-T6	**S**	$Rsm = 0{,}0402778 + 0{,}731667 * f$	58,69
	MQL	$Rsm = 0{,}0728 - 0{,}395\, f + 6{,}23\, f^2$	90,35
	L	$Ln(Rsm) = -2{,}956 + 7{,}08\, f$	38
7075-T651	**S**	$Rsm = 0{,}0467778 + 0{,}691667 * f$	80,91
	MQL	$Rsm = 0{,}0226 + 0{,}883\, f$	90.89
	L	$Rsm = 0{,}0226 + 0{,}883\, f$	74,84

Tableau 3.8 Équations de prédiction des Rk

Matériau	MDL	Équations	R^2(%)
2024-T4	**S**	$Rk = 0{,}588222 + 23{,}0317 * f - 1{,}96389 * R_\varepsilon$	64,60
	MQL	$Rk = 0{,}458083 + 19{,}255 * f - 1{,}50565 * R_\varepsilon$	80,52
	L	$Rk = -0{,}393722 + 23{,}0317 * f$	52,27
6061-T6	**S**	$Rk = 1{,}12675 + 19{,}4783 * f - 2{,}50315 * R_\varepsilon$	63,93
	MQL	$Rk = -0{,}051 + 16{,}98\, f$	56
	L	$Rk = 1{,}157 - 2{,}546\, R_\varepsilon + 20{,}99\, f$	55,49
7075-T651	**S**	$Rk = -1{,}44417 + 53{,}64 * f + 2{,}155 * R_\varepsilon - 53{,}625 * f * R_\varepsilon$	84,18
	MQL	$Rk = -2{,}10467 + 59{,}1125 * f + 3{,}65869 * R_\varepsilon - 66{,}3661 * f * R_\varepsilon$	89,73
	L	$Rk = -2{,}37 + 3{,}88\, R_\varepsilon + 68{,}8 * f - 81{,}3\, R_\varepsilon * f$	84

Tous les modèles de prédiction proposés sont valides pour un rayon du bec de l'outil variant entre 0,2 et 0,8mm, et une vitesse d'avance variant entre 0,05 et 0,15mm/tr. De plus, et en se basant sur les équations proposées, des surfaces de réponses sont générées. Ces surfaces permettent de visualiser la plage des différentes valeurs que peuvent prendre les paramètres

décrivant l'état de surface, et ce pour la plage de variation des facteurs. Ceci permettra de choisir les valeurs des paramètres de coupe en fonction de l'état de surface escompté. La figure 3.12 permet de visualiser la variation de la surface de réponse en fonction des variations du rayon du bec de l'outil et de la vitesse d'avance.

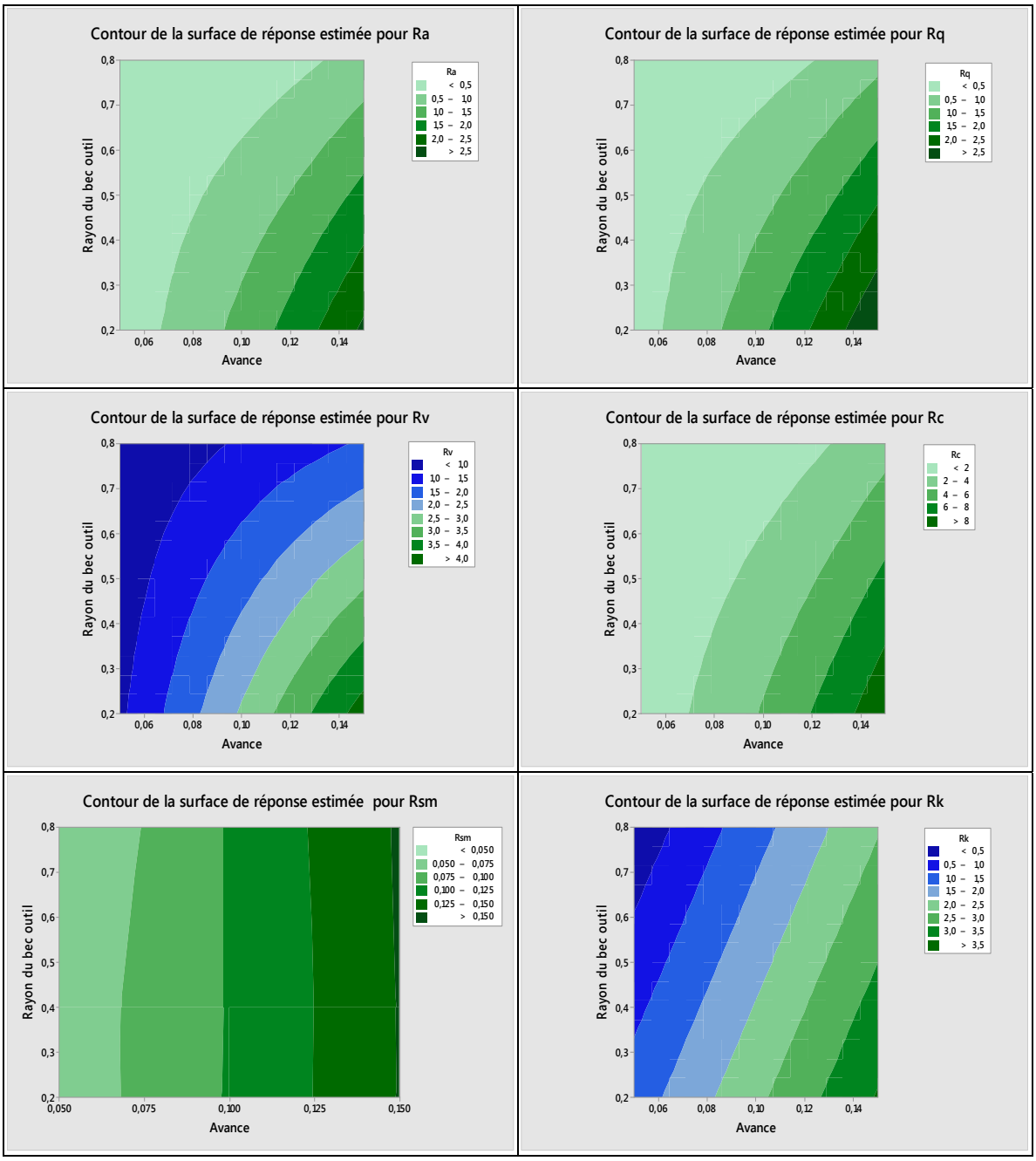


Figure 3.12 Contours de la surface de réponse estimée pour le 2024-T4 usiné à sec

Dans la suite de cette étude, les graphiques détaillés des résultats de l'analyse statistique seront présentées dans les annexes de ce mémoire. Seule l'analyse des résultats principaux est présentée dans ce chapitre avec les modèles de prédiction proposés.

La même démarche d'analyse a été suivie pour l'analyse du comportement des paramètres de rugosité afin d'aboutir à des modèles de prédiction logiques. Les facteurs les plus influents ont été décelés, l'homogénéité de la variance et la normalité des résidus ont été vérifiées. De plus, des surfaces de réponses ont été générées nous permettant de visualiser en fonction du domaine de variations des facteurs retenus lors de la modélisation, la plage de variation des paramètres de rugosité. Les résultats de l'étude statistique de ces paramètres ont été classés dans les annexes de ce mémoire pour éviter tout encombrement vu la multitude des résultats dérivant de la même démarche d'étude.

Comme le plan d'expériences avec lequel nous travaillons possède un certain vice se traduisant par la non équidistance entre les niveaux du facteur rayon du bec de l'outil (ce qui fait de lui une variable non centrée ayant pour valeurs 0.2, 0.4 et 0.8mm), et si on opte pour une standardisation des niveaux des facteurs dans un intervalle [-1,1], la valeur centrale du facteur rayon du bec de l'outil n'arrivera pas à la valeur zéro lors du déplacement de l'origine des mesures. De ce fait et comme les expériences ont été réalisées de la sorte, l'analyse a été faite avec les valeurs naturelles plutôt qu'avec les variables codées comme les produits scalaires des colonnes de la matrice d'expériences et suite à un codage, n'arrivent pas tous à la valeur zéro, valeur caractéristique d'un plan orthogonal centré. Ainsi, l'ensemble des modèles empiriques de prédiction suggérées sont considérés valides pour une vitesse d'avance variant entre 0.05 et 0.15mm/tr, et pour un rayon du bec de l'outil variant entre 0.2 et 0.8mm, c'est-à-dire dans le domaine expérimental de l'étude.

Pour le 2024-T4 usiné à quantité minimale de lubrification, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE IX.

Pour le 2024-T4 usiné à lubrification abondante, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE X.
Pour le 7075-T651 usiné à sec, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE VI.

Pour le 7075-T651 usiné à quantité minimale de lubrification, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE VII.

Pour le 7075-T651 usiné à lubrification abondante, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE VIII.

Pour le 6061-T6 usiné à sec, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE III.

Pour le 6061-T6 usiné à quantité minimale de lubrification, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE IV.

Pour le 6061-T6 usiné à lubrification abondante, les graphiques de Pareto, des normalités des résidus, des homogénéités de la variance et des contours de la surface de réponse estimée sont présentés dans l'ANNEXE V.

Le but étant l'analyse du comportement des paramètres de rugosité en fonction des paramètres d'usinage, suite à une analyse de la variance, les graphiques Pareto ont mis en évidence la contribution de chaque facteur sur chaque réponse en les classant par ordre

décroissant dans leur contribution dans les réponses. Suite à l'élimination des paramètres non significatifs, nous avons abouti à des graphiques de Pareto avec un taux de variabilité supérieur à de l'ordre de 85% à 95% selon les paramètres, et ce dans la majorité des graphiques sauf pour R_{sm} et R_k qui ont présenté un taux de variabilité moindre dans certains cas. Pour cela et suite à la modélisation, l'étude graphique comparative entre les matériaux usinés sous différentes conditions ne tiendra pas compte des réponses R_{sm} et R_k.

Les facteurs retenus pour modéliser le comportement des réponses sont la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil, qui sont facteurs les plus significatifs ayant un poids remarquable dans les modèles de prédictions suite à leurs contributions directes ou suite à leurs interactions.

Afin de s'assurer de la validité de nos modèles et pour chacun des paramètres de rugosité étudié, une comparaison entre les valeurs prédites et celles observées est traduite par les graphiques des réponses présents dans les annexes précisés pour chacun des matériaux. Il a été constaté que l'homogénéité de la variance est assurée vu que les points se situent de part et d'autres de la droite oblique sans avoir une tendance d'éloignement de cette dernière qui caractérise un modèle prédit qui coïncide exactement avec les valeurs expérimentales observées. Sauf que la théorie qui dit que les points peuvent se situer exactement sur cette droite oblique est pratiquement impossible vu qu'il est impossible de se dissocier du facteur bruit qui est toujours présent selon des degrés d'importance en fonction de plusieurs facteurs, tels que l'environnement ou le mécanisme en lui-même.

Afin de s'assurer de la validité des modèles proposés, la normalité des résidus a été vérifiée. En dehors de quelques points aberrants qui se détachent de la droite de normalité, tous les graphiques de la normalité des résidus ont confirmé cette normalité.

Pour ce qui est des effets principaux et interactions, chacune des réponses a présenté exactement le même comportement que l'on peut apercevoir dans les figures 3.6 et 3.8. L'avance, le rayon du bec de l'outil et leurs interactions sont les plus influents. Au fur et à

Rapport-Gratuit.com

mesure que la vitesse d'avance augmente, les réponses augmentent avec, et, au fur et à mesure que le rayon du bec de l'outil diminue, les paramètres de rugosité augmentent avec.

Une étude comparative graphique pour la rugosité de surface arithmétique R_a entre les valeurs expérimentales et celles prédites est présentée dans les figures ci-après.

Les figures 3.13, 3.14 et 3.15 illustrent le comportement du paramètre de rugosité arithmétique R_a entre ses valeurs prédites et ses valeurs expérimentales pour le 2024-T4, le 6061-T6 et le 7075-T651 en usinage S, MQL et L. La moyenne de l'erreur absolue moyenne pour le 6061-T6 est de 0,019 microns. Pour 2024-T4, cette valeur est de 0,15 microns et pour le 7075-T651, l'erreur moyenne est de 0,018 microns.

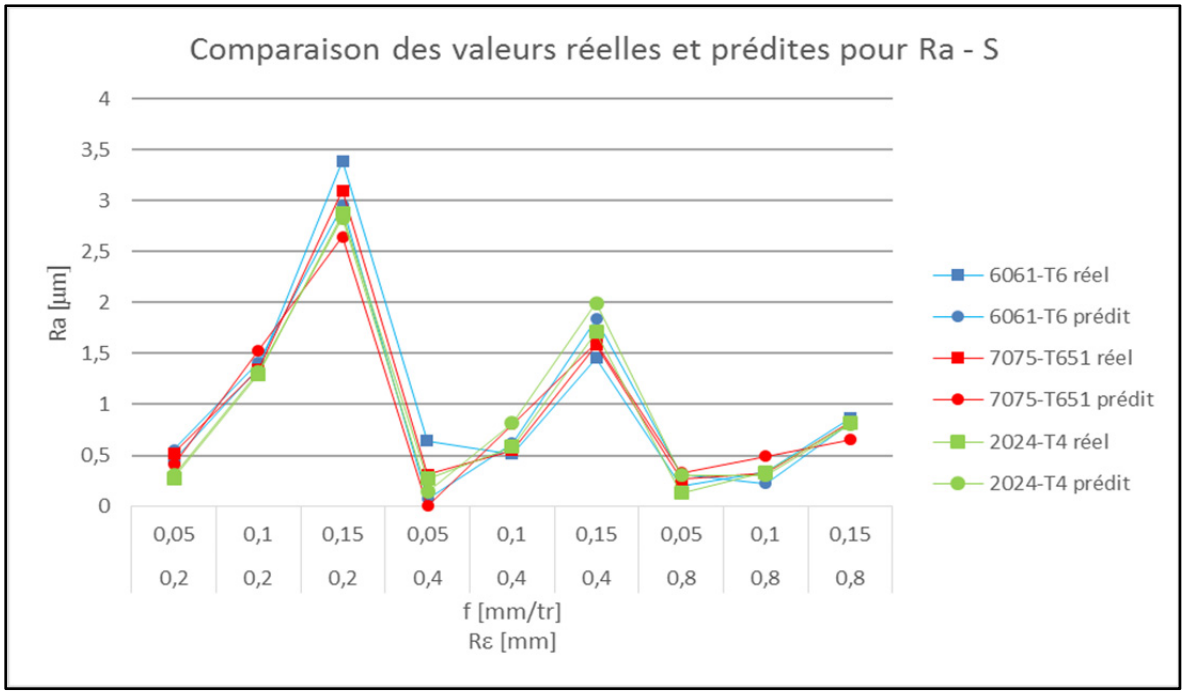


Figure 3.13 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage à sec

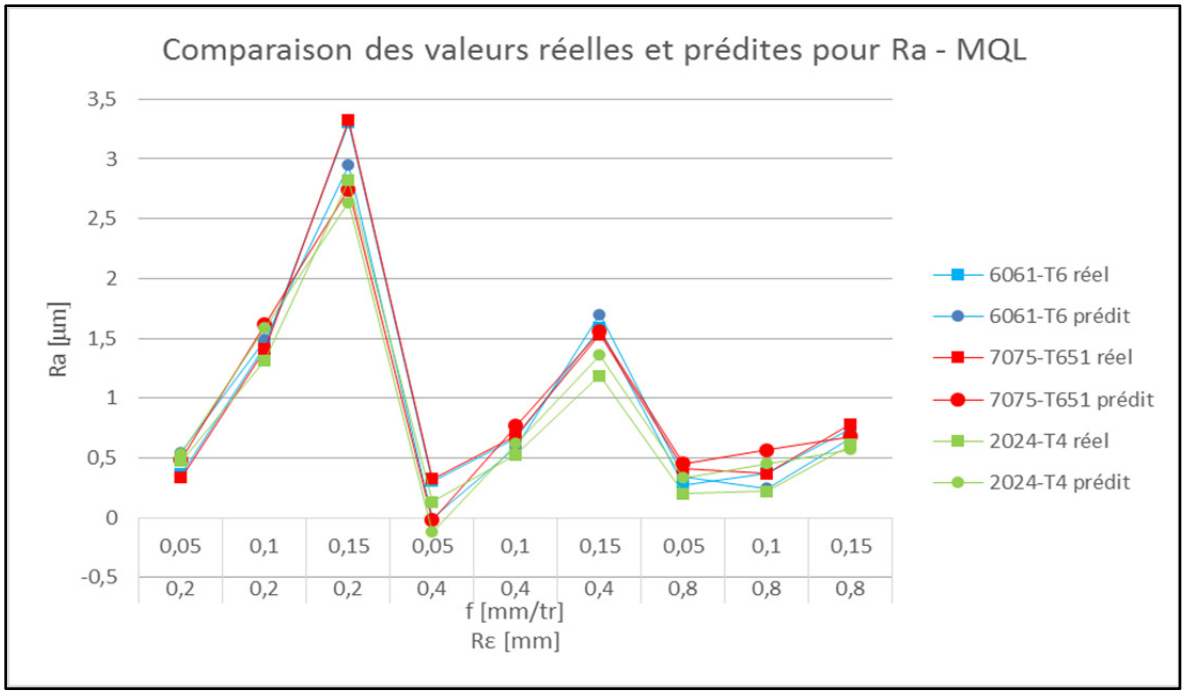


Figure 3.14 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage MQL

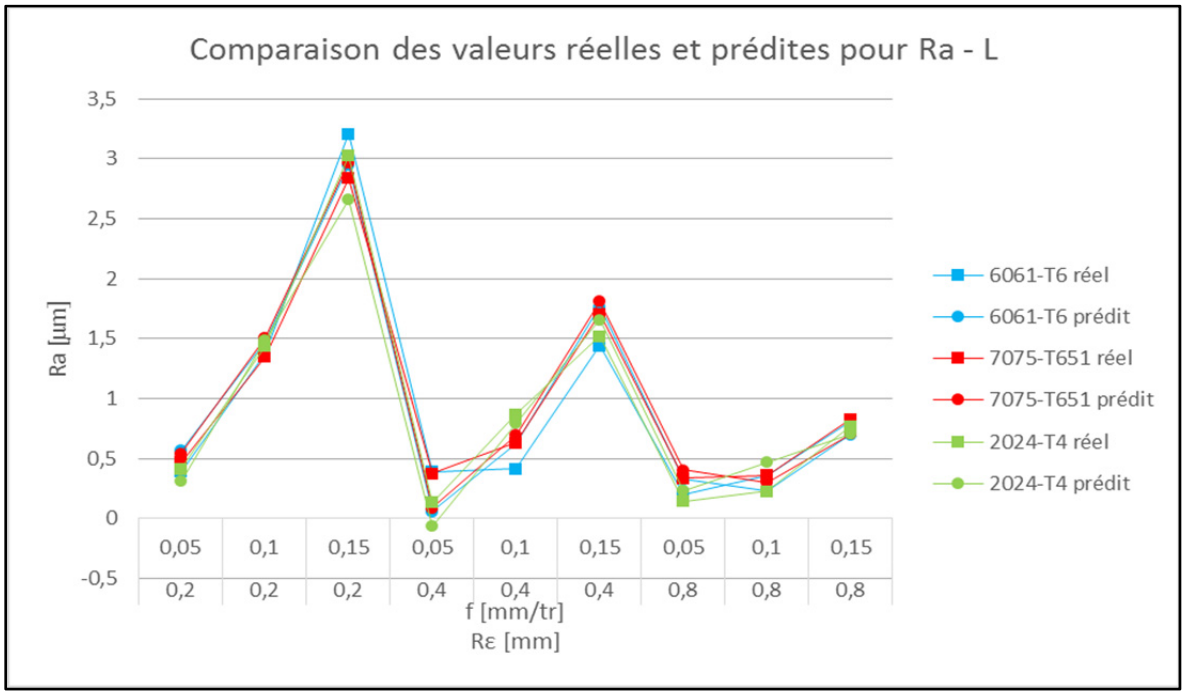


Figure 3.15 Ra mesurées Vs Ra prédites en usinage à lubrification abondante

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le reste des graphiques de comparaison entre les valeurs réelles et prédites sont regroupés dans l'annexe XI. D'après ces graphiques et des erreurs absolues calculées, nous pouvons constater que les modèles prédits sont satisfaisants.

3.3.6 Optimisation de la rugosité de surface arithmétique R_a

Une optimisation multi réponses est proposée pour la rugosité de surface arithmétique R_a pour le 7075-T651, le 6061-T6 et le 2024-T4 sous différents mode de lubrification suite à la modélisation effectuée. Les résultats optimaux qui minimisent la rugosité arithmétique et qui assurent une désirabilité de 1 sont présentés dans ce qui suit en fonction des modes de lubrification étudiés.

3.3.6.1 Optimisation pour l'usinage à sec

Tableau 3.9 Paramètres de coupe optimaux en usinage S

Usinage à sec			
Matériau	**2024-T4**	**6061-T6**	**7075-T651**
Ra optimale (µm)	0,0917	0,0313	0,1299
f (mm/tr)	0,077125		
Rε (mm)	0,610813		

Tableau 3.10 Réponses optimales en usinage S

Réponse	**Optimum**	**Désirabilité individuelle**
Ra 2024- T4 S	0,0917	1
Ra 6061- T6 S	0,0313	1
Ra 7075- T651 S	0,1299	1

La valeur optimale de la désirabilité globale est de 1. Les tableaux 3.9 et 3.10 résument les résultats optimaux pour une avance optimale de 0,07 mm/tr et un rayon du bec de l'outil de 0,6 mm.

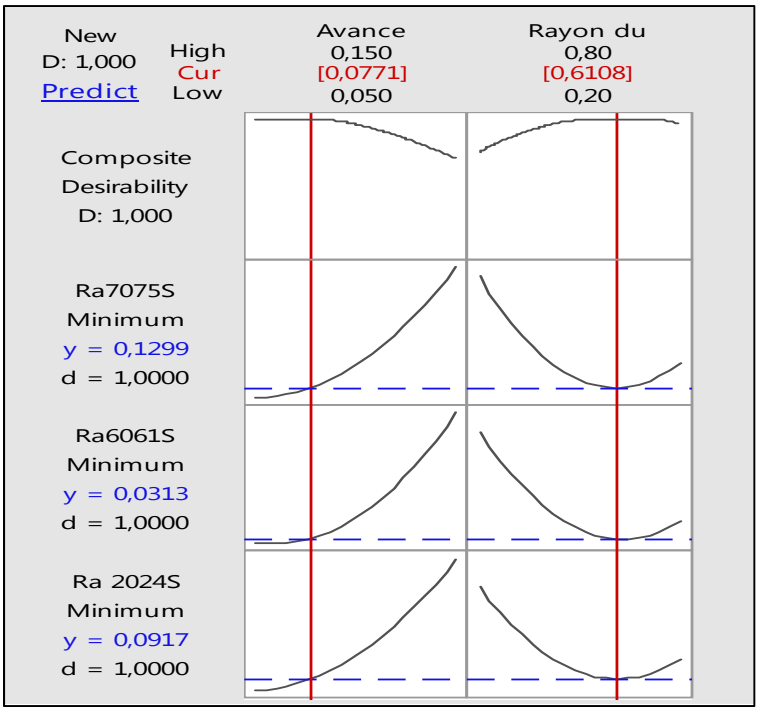


Figure 3.16 Désirabilité en usinage S

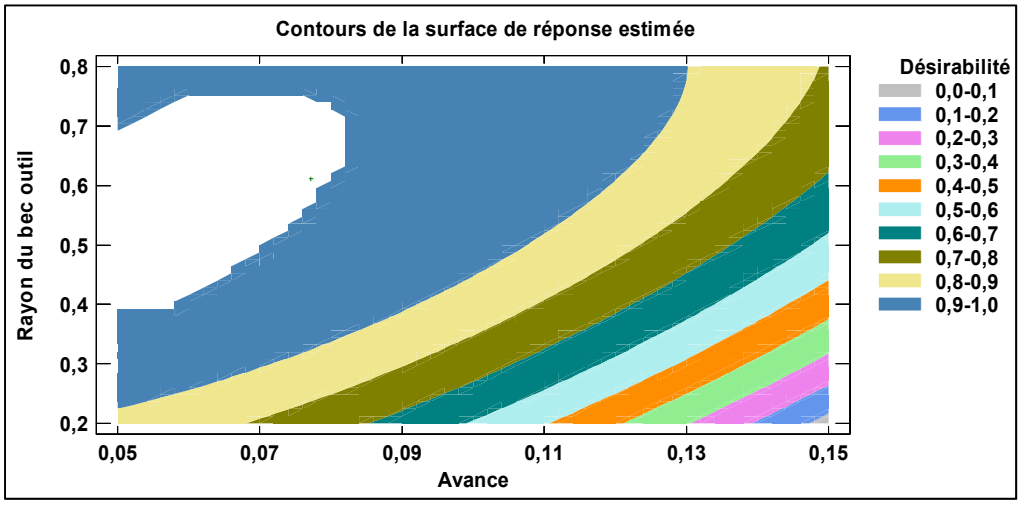


Figure 3.17 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage sec

Avec :

- Rayon du bec outil $\in [0.2, 0.8]$[mm];
- Avance $\in [0.05, 0.15]$[mm/tr].

D'après le graphique de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage S (figure 3.17), nous pouvons constater que la désirabilité globale est à son maximum pour les avances les plus faibles et pour les rayons moyens.

3.3.6.2 Optimisation pour l'usinage à quantité minimale de lubrification MQL

La valeur optimale de la désirabilité globale est de 1. Les tableaux 3.11 et 3.12 résument les résultats pour une avance optimale de 0,08 mm/tr et un rayon du bec de l'outil de 0,5 mm.

Tableau 3.11 Paramètres de coupe optimaux en usinage MQL

Usinage MQL			
Matériau	**2024-T4**	**6061-T6**	**7075-T651**
Ra optimale (µm)	0,0666	0,0866	0,1957
f (mm/tr)	0,087		
Rε (mm)	0,5615		

Tableau 3.12 Réponses optimales en usinage MQL

Réponse	**Optimum**	**Désirabilité individuelle**
R_a 2024- T4 MQL	0,0666	1
Ra 6061- T6 MQL	0,0866	1
Ra 7075- T651 MQL	0,1957	1

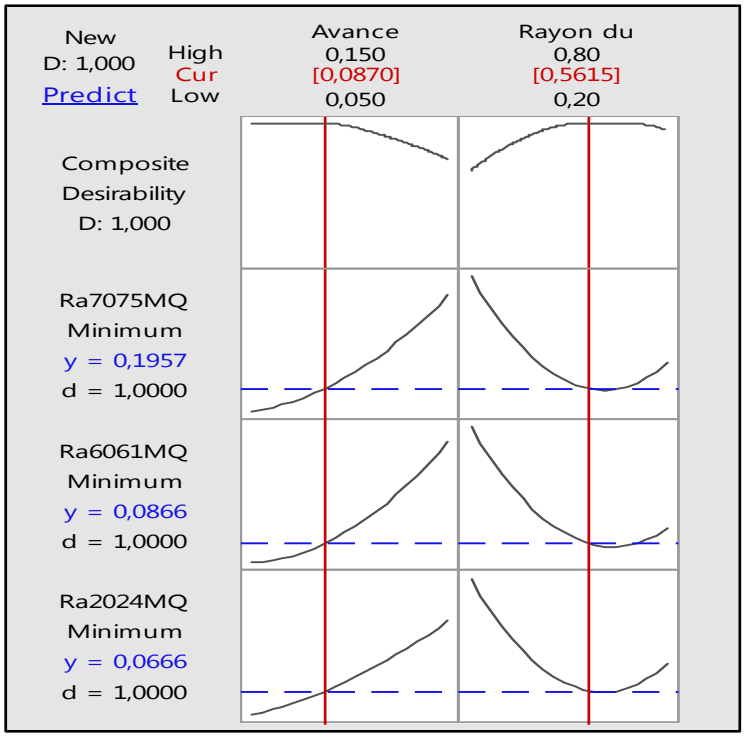


Figure 3.18 Désirabilité en usinage MQL

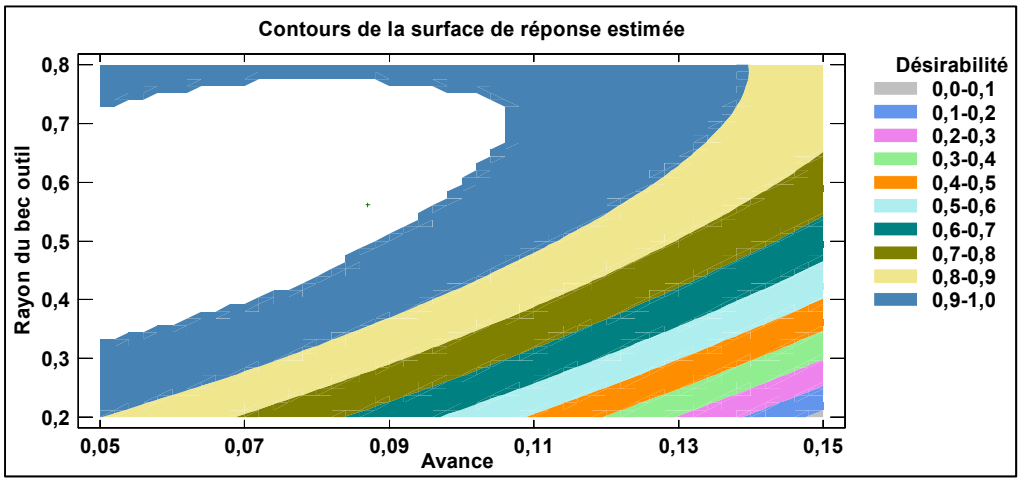


Figure 3.19 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage MQL

Avec :

- Rayon du bec outil $\in [0.2, 0.8]$[mm];
- Avance $\in [0.05, 0.15]$[mm/tr].

D'après la figure 3.19 de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage à quantité de lubrification minimale, nous pouvons constater que la désirabilité globale est à son maximum pour les avances les plus faibles à moyennes et pour les rayons moyens.

3.3.6.3 Usinage à lubrification abondante

La valeur optimale de la désirabilité globale est de 0,98. Les tableaux 3.13 et 3.14 résument les résultats optimaux pour une avance optimale de 0,05 mm/tr et un rayon du bec de l'outil de 0,4 mm.

Tableau 3.13 Paramètres de coupe optimaux en usinage L

Usinage L			
Matériau	**2024-T4**	**6061-T6**	**7075-T651**
Ra optimale (µm)	0,0027	0,0376	0,07878
f (mm/tr)	0,050		
Rε (mm)	0,4150		

Tableau 3.14 Réponses optimales en usinage L

Réponse	**Optimum**	**Désirabilité individuelle**
Ra 2024- T4 L	0,0027	0,99
Ra 6061- T6 L	0,0376	0,98
Ra 7075- T651 L	0,07878	0,97

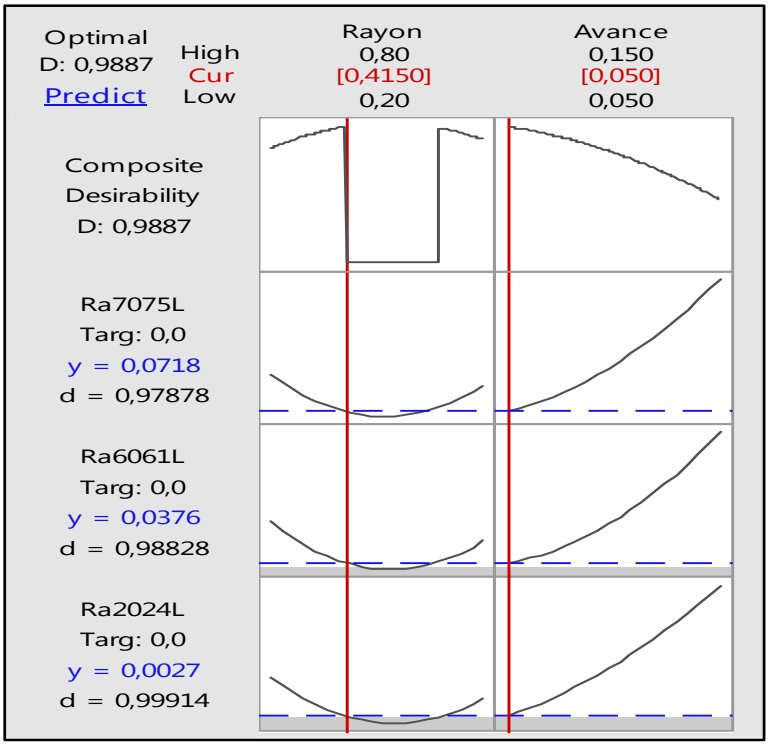


Figure 3.20 Désirabilité en usinage L

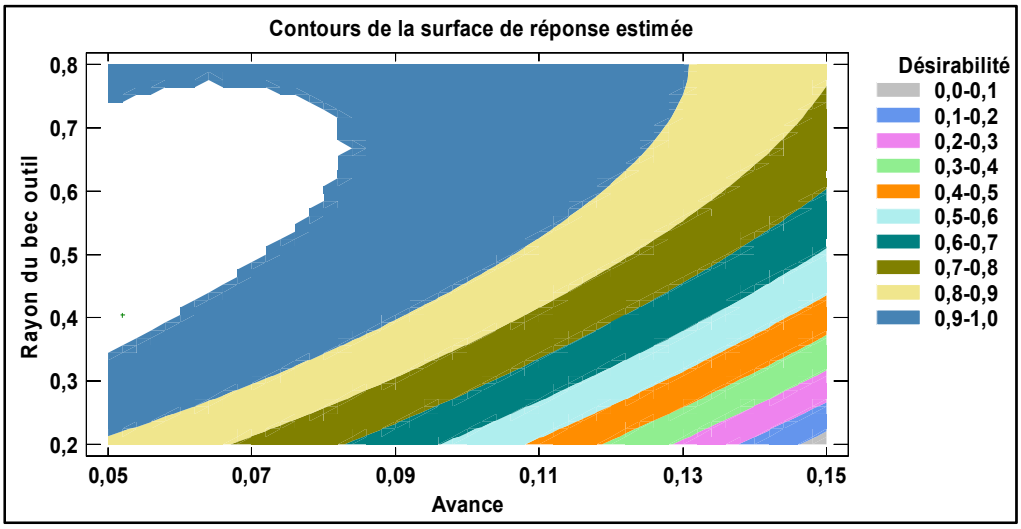


Figure 3.21 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage L

Avec :

- Rayon du bec outil $\in [0.2, 0.8]$[mm];
- Avance $\in [0.05, 0.15]$[mm/tr].

D'après le graphique de la surface de réponse estimée pour la désirabilité en usinage L, nous pouvons constater que la désirabilité globale est à son maximum pour les avances les plus faibles et pour les rayons des moyens aux plus élevés.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude des effets des conditions de coupe et des modes de lubrification sur les paramètres de rugosité de surface a été faite. Il a été conclu que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la diminution du rayon du bec de l'outil qui sont les paramètres les plus significatifs sur la rugosité. De plus, les matériaux et les modes de lubrification n'ont pas présenté un effet significatif sur la variation de la rugosité. Cependant, une légère différence a été observée avec les valeurs les plus faibles qui ont été enregistrées pour les éprouvettes usinée à quantité minimale de lubrification.

Des modèles de prédiction ont été proposés et une optimisation de la rugosité de surface arithmétique a été suggérée.

Dans le chapitre suivant, nous allons investiguer le comportement des contraintes résiduelles de surface en fonction des conditions d'usinage et des modes de lubrification.

CHAPITRE 4

CONTRAINTES RÉSIDUELLES

4.1 Introduction

Le but principal de cette partie est d'étudier les effets des paramètres de coupe et des modes de lubrification sur les contraintes résiduelles de surface pour les matériaux Al2024-T4 et le Al6061-T6.

Afin de quantifier les contraintes résiduelles de surface mesurées sur les différentes éprouvettes élaborées sous différentes conditions d'usinage, une méthode de mesure non destructive par diffraction X a été utilisée. Le but principal étant de vérifier l'effet des conditions d'usinage sur la présence de ces contraintes sur les éprouvettes qui seront par la suite soumises à des tests de traction uniaxiale, une étude statistique est faite proposant des modèles de prédictions des contraintes résiduelles de surface. La matrice des essais pour les contraintes résiduelles est présentée dans l'annexe XII.

4.2 Analyse des contraintes résiduelles

Les paramètres étudiés sont regroupés en paramètres qualitatifs (mode de lubrification et matériau), et en paramètres quantitatifs (vitesse d'avance et rayon du bec de l'outil). Dans cette partie, le matériau et le mode de lubrification sont fixés et le plan complet de l'étude est divisé en six sous plans en fonction des matériaux et des modes de lubrification où seuls les facteurs quantitatifs sont pris en compte, à savoir l'avance par tour et le rayon du bec de l'outil.

Les effets principaux des facteurs et leurs interactions sur les contraintes résiduelles sont déterminés (figure 4.1) et une forme générale de la réponse en modèle polynomial a été proposée pour chacune des conditions d'usinage étudiée afin de proposer des modèles mathématiques des contraintes en adoptant la méthode des surfaces de réponse.

Rapport-Gratuit.com

$$\sigma_s = a_0 + \sum_{i=1}^{2} a_i x_i + \sum_{i=1}^{2} a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} a_{ij} x_i\, x_j + e_i \qquad (4.1)$$

Avec :

x_i variable explicative i;

x_i^2 effet quadratique des variables;

$x_i x_j$ interaction entre les variables;

a_i coefficient des paramètres estimés;

a_{ij} coefficient d'interaction entre i et j;

e_i terme d'erreurs non observables du modèle.

4.2.1 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes résiduelles

Dans un premier temps, on procède à une étude globale des influences des facteurs sur les réponses. Nous allons étudier l'influence des facteurs qualitatifs (matériaux et modes de lubrification) et ceux quantitatifs (avance et rayon du bec de l'outil), ainsi que leurs interactions sur les contraintes résiduelles (figure 4.1).

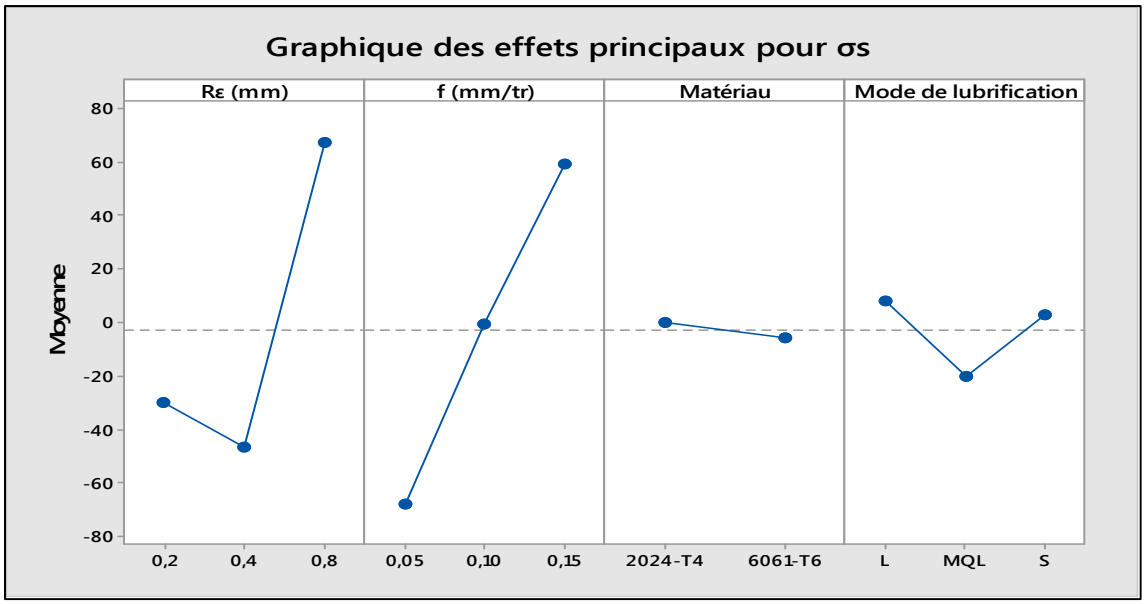


Figure 4.1 Effets principaux des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles

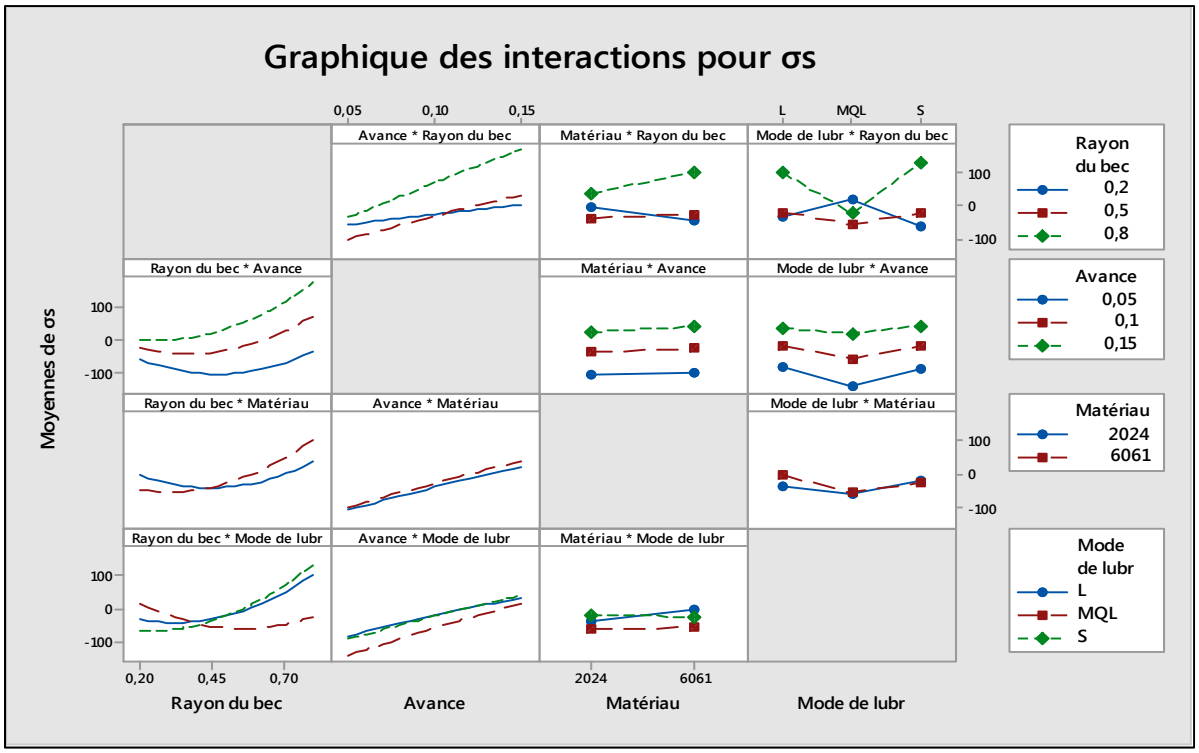


Figure 4.2 Interactions des paramètres de coupe sur les contraintes résiduelles

D'après le diagramme des effets principaux (figure 4.1), on constate que le type du matériau n'a pratiquement pas d'effet sur les contraintes résiduelles et que le mode de lubrification influe légèrement. Les contraintes les plus faibles sont enregistrées pour le mode de lubrification MQL. Cependant, nous observons une grande influence de l'avance suivie du rayon du bec de l'outil. Les contraintes résiduelles sont plus élevées pour les vitesses d'avance les plus élevées avec un effet direct quasi-linéaire et proportionnel. Pour le rayon du bec de l'outil, nous constatons un effet à tendance quadratique. Le deuxième niveau du rayon du bec de l'outil, de valeur réelle 0,4mm, présente les valeurs les plus faibles des contraintes. Au-delà de cette valeur, plus sa valeur augmente, plus la valeur des contraintes résiduelles augmente. Plus le rayon du bec de l'outil diminue, plus les contraintes résiduelles augmentent.

De plus, d'après le diagramme des interactions (figure 4.2), on constate que les deux matériaux se comportent d'une façon semblable, et ce pour les différents rayons du bec et les

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

vitesses d'avance. On a enregistré les valeurs les plus faibles des contraintes résiduelles pour les plus petites avances, les rayons du bec moyens et pour le mode de lubrification MQL qui a présenté les plus faibles valeurs des contraintes. Cependant, on remarque une légère différence entre les deux matériaux, où le 2024-T4 présente des valeurs légèrement plus élevées des contraintes résiduelles que pour le 6061-T6.

Les contraintes résiduelles observées sont générées par les phénomènes thermiques et mécaniques ayant lieu dans les zones de coupe, en plus des phénomènes reliées à la microstructure du matériau, donnant naissance à des contraintes de traction ou de compression selon que l'un ou l'autre des phénomènes l'emporte.

Nous avons constaté que les contraintes résiduelles augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil. Cet accroissement des contraintes avec l'augmentation de la vitesse d'avance peut s'expliquer par l'élévation des efforts au niveau de la zone de coupe générant des effets thermiques importants d'où l'augmentation de l'énergie dissipée. L'intensité d'écrouissage en surface diminue et le matériau s'adoucit. Les contraintes ont alors tendance à aller vers la traction.

De plus, avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil, la pression de l'outil sur la pièce par unité de surface diminue entrainant des déformations plastiques plus faibles. L'effet de la dilatation l'emporte alors sur l'effet de l'écrouissage entrainant moins de contraintes compressives.

Pour ce qui est de la lubrification, le coefficient de transfert thermique augmente avec le débit et le coefficient de frottement diminue. Les contraintes résiduelles sont plus compressives. La lubrification à quantité minimale MQL peut alors être considérée comme un domaine optimal pour obtenir des contraintes compressives. Il faut ensuite varier le débit étant donné que, dans cette étude, la lubrification abondante a présenté des valeurs de contraintes plus élevées que la MQL. Cette augmentation de valeurs de contraintes peut être expliqué par le fait que le fluide de coupe appliqué de manière conventionnelle peut

difficilement pénétrer à l'interface outil/copeaux là où la température est à son niveau maximum et dans laquelle le contact outil/copeau est majoritairement de nature plastique particulièrement aux plus grandes vitesses d'avance. Cependant, la MQL a pu se rapprocher plus de cette interface et la refroidir selon les différentes combinaisons de vitesse d'avance et de rayon du bec de l'outil (Dhar et al., 2006) (García Navas et al. 2012).

4.2.2 Analyse Pareto des contraintes résiduelles

Le diagramme Pareto (figure 4.3) classe les facteurs et leurs influences sur les contraintes résiduelles en ordre décroissant. Tous ceux qui présentent un effet inférieur à la limite significative d'intervalle de confiance de 95% ne seront pas pris en compte et seront éliminés lors de la modélisation par la suite. Le coefficient de détermination est de l'ordre de **62,15%** ce qui n'est pas une valeur satisfaisante. Ceci conclut que les facteurs et interactions initiaux expliquent 62% de la variabilité du système. D'où la nécessité d'éliminer les facteurs non significatifs, à savoir le matériau, le mode de lubrification et leurs interactions avec les facteurs du plan.

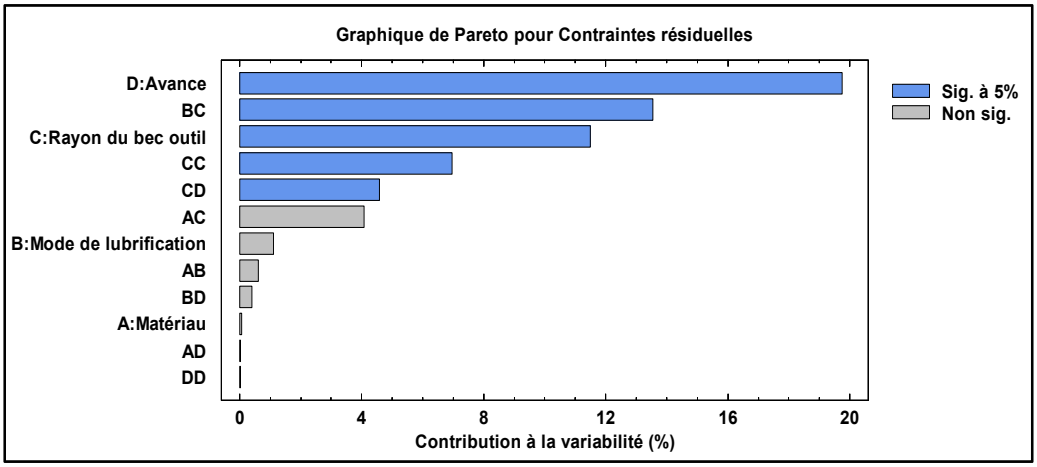


Figure 4.3 Graphique de Pareto pour les contraintes résiduelles

Ensuite, l'étude sera faite pour les deux matériaux retenus pour cette partie, à savoir le 2024-T4 et le 6061-T6, pour les trois modes de lubrification, et ce chacun à part en fonction de l'avance et du rayon du bec de l'outil.

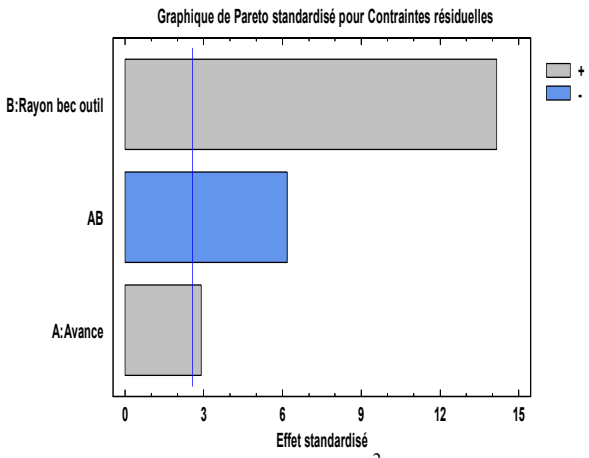
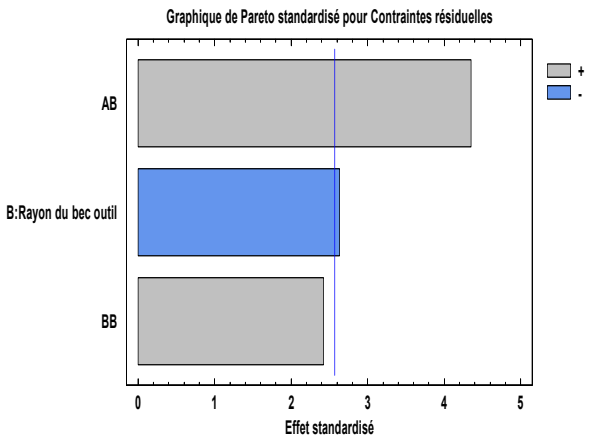
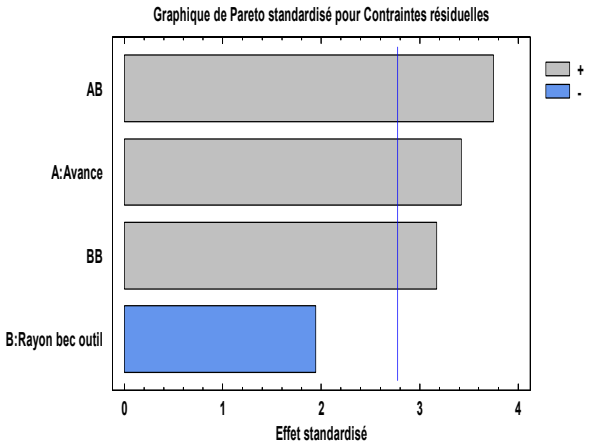
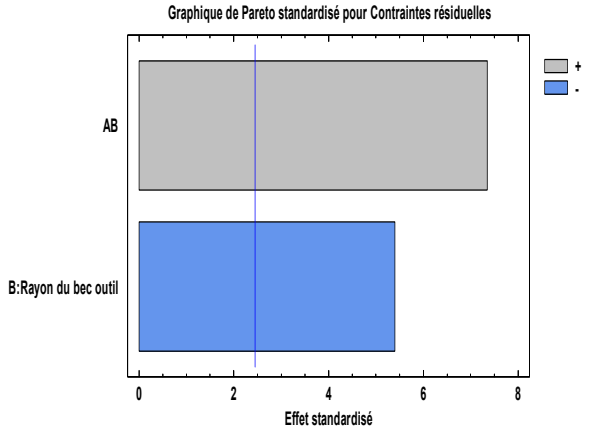
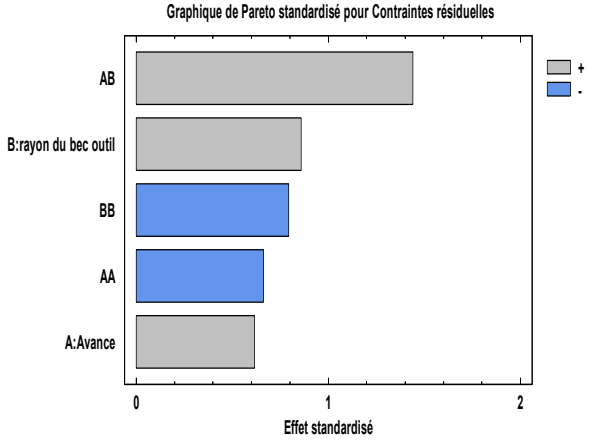
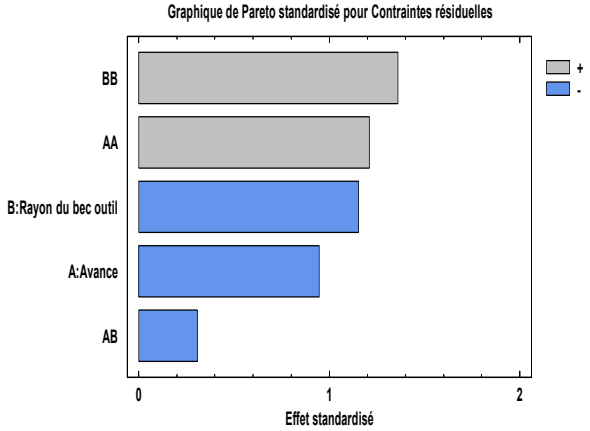
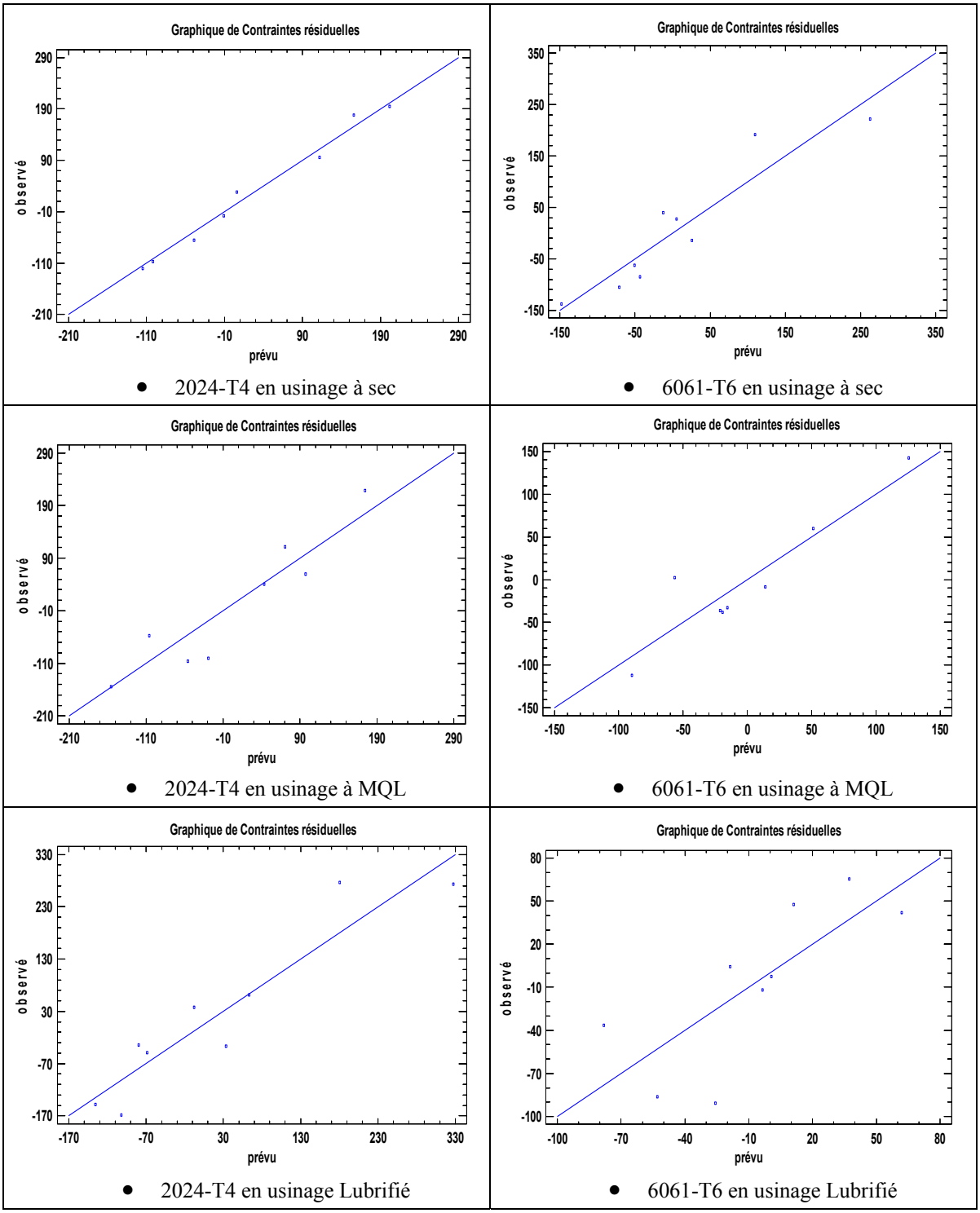
2024-T4	6061-T6
 • Usinage à sec, R^2 = 91,66%	 • Usinage à sec, R^2 = 87,39%
 • Usinage à MQL, R^2 = 89,66%	 • Usinage à MQL, R^2 = 89,99%
 • Usinage lubrifié, R^2 = 90,61%	 • Usinage lubrifié, R^2 = 59,12%

Figure 4.4 Graphique de Pareto après sélection des facteurs significatifs

La figure 4.4 présente les graphiques de Pareto suite à la distinction des paramètres ayant un effet significatif sur les contraintes résiduelles. Seuls le rayon du bec de l'outil et la vitesse d'avance sont pris en considérations. Nous constatons un taux de variabilité supérieur à 87% sauf pour le cas de l'usinage à lubrification abondante qui présente un faible taux de variabilité. Après avoir essayé plusieurs transformations qui n'ont pas abouti à de meilleurs résultats, nous adopteront dans notre modélisation pour cette sélection de facteurs et interactions dans notre modélisation des contraintes résiduelles de surface.

4.2.3 Analyse de l'homogénéité de la variance pour les contraintes résiduelles

Dans la figure 4.5, les résultats observés et ceux prédits sont comparés. Les points se situent de part et d'autre de la droite oblique d'une façon homogène et n'ont pas une tendance apparente d'éloignement de cette droite. Cette droite traduit le fait que le modèle est acceptable et obéit au comportement observé lors des expériences, chose qui est difficile à atteindre vu la présence du bruit sous plusieurs formes, ce qui peut engendrer des erreurs. Nous pouvons dire alors que les points forment un nuage autour de la droite oblique sans s'éloigner de cette dernière avec une tendance linéaire, et ce pour le 2024-T4 et le 6061-T6.



- 2024-T4 en usinage à sec
- 6061-T6 en usinage à sec
- 2024-T4 en usinage à MQL
- 6061-T6 en usinage à MQL
- 2024-T4 en usinage Lubrifié
- 6061-T6 en usinage Lubrifié

Figure 4.5 Comparaison entre les valeurs observées et prédites pour les contraintes résiduelles

4.2.4 Analyse des résidus pour les contraintes résiduelles

La figure 4.6 présente les graphiques des probabilités normales des résidus qui sont la différence entre les valeurs observées et les valeurs réelles. Nous constatons que les résidus sont normalement distribués sans compter quelques points aberrants qui s'éloignent de la droite de normalité.

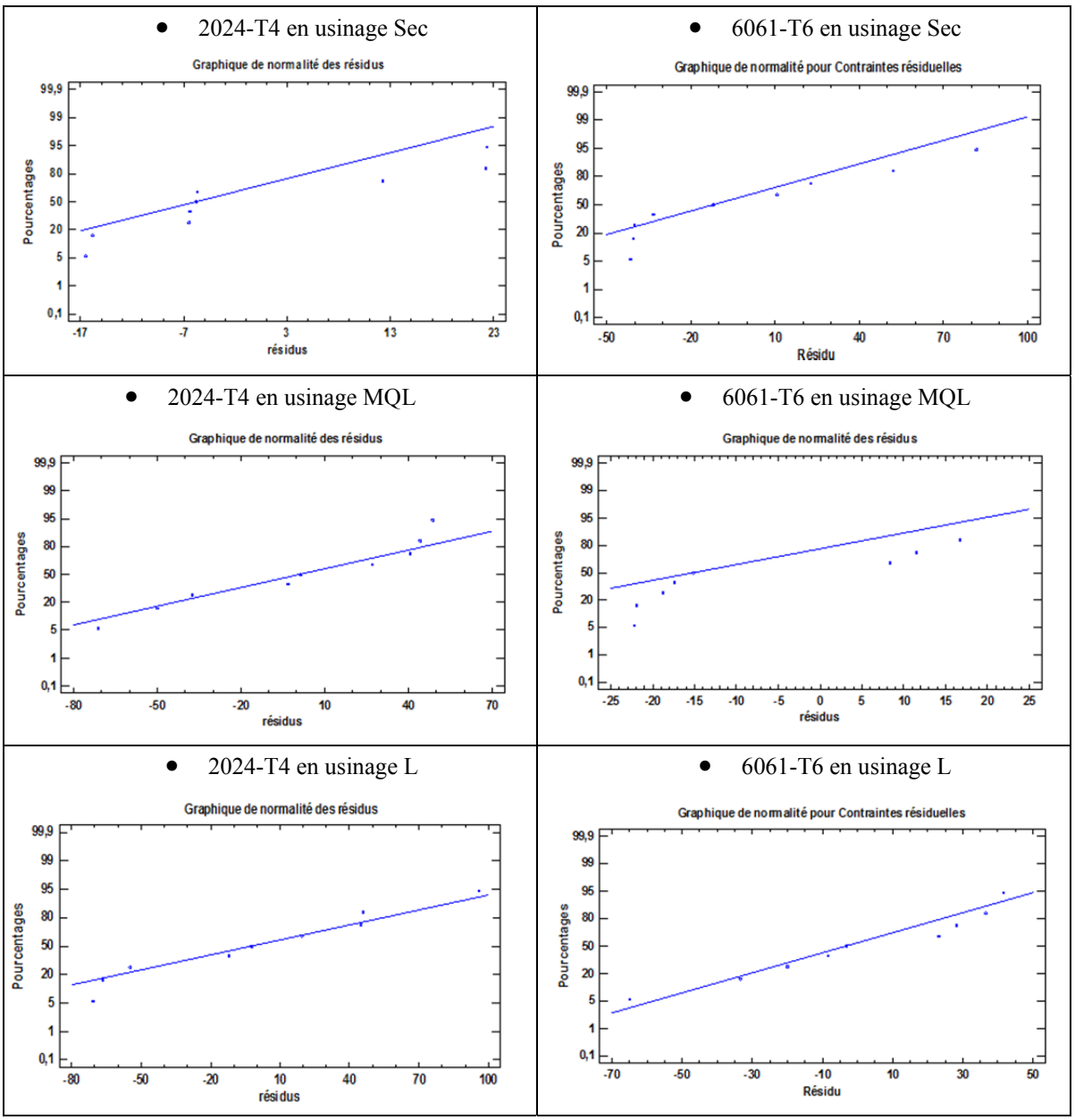
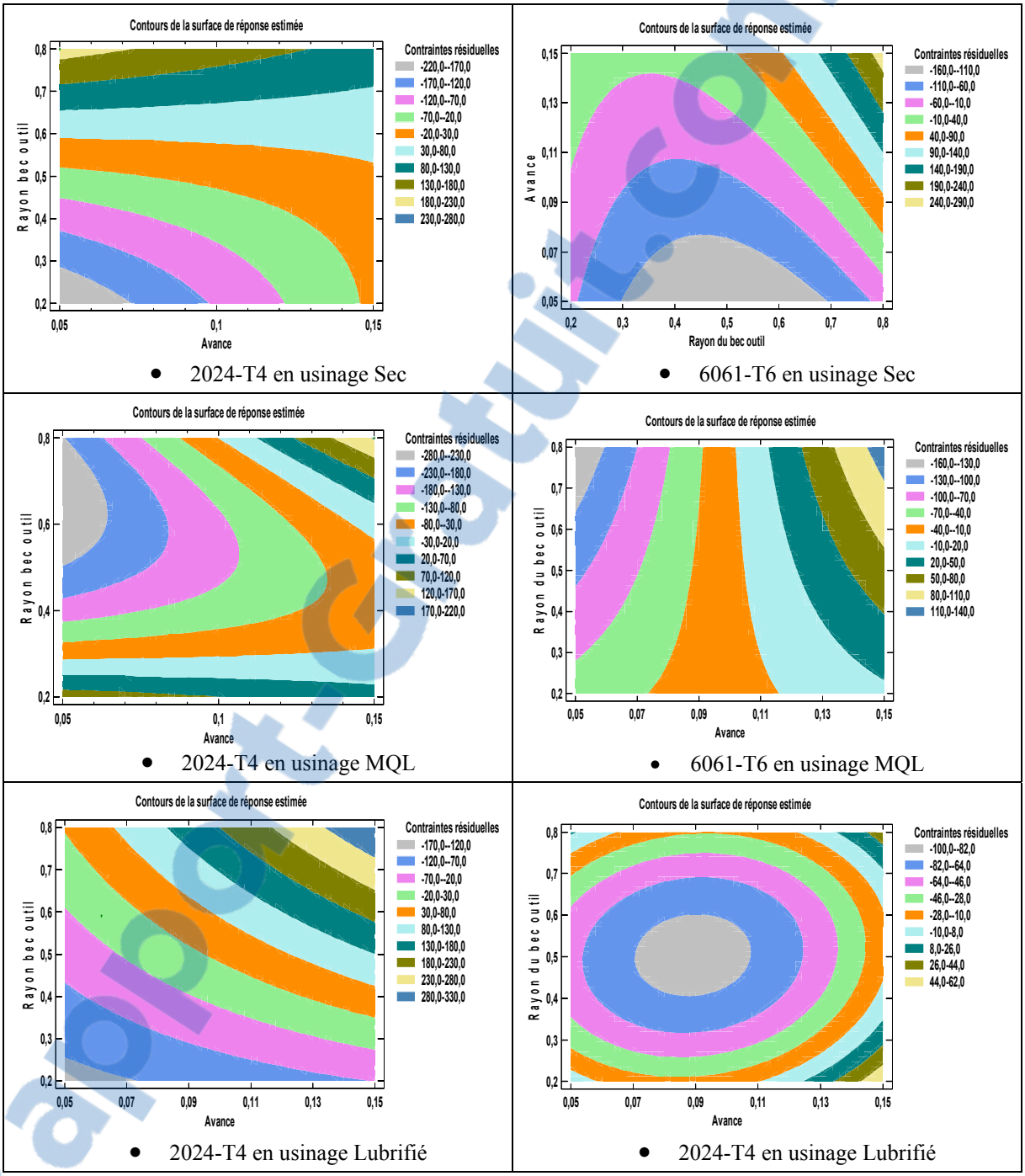


Figure 4.6 Graphique de normalité des résidus pour les contraintes résiduelles

Les graphiques des résidus en fonction des données relatives aux variables explicatives ont été aussi investigués et une répartition uniforme à l'intérieur d'une bande est observée.

4.2.5 Contours de la surface de réponse estimée pour les contraintes résiduelles

La figure 4.7 des contours de la surface de réponse estimée nous permet de voir clairement l'influence de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil sur les contraintes résiduelles pour les deux matériaux et pour les trois modes de lubrification. Par la suite, et en fonction des contraintes résiduelles escomptées, un choix des paramètres de coupe peut être fait en fonction des modes de lubrification et du matériau à usiner.



- 2024-T4 en usinage Sec
- 6061-T6 en usinage Sec
- 2024-T4 en usinage MQL
- 6061-T6 en usinage MQL
- 2024-T4 en usinage Lubrifié
- 2024-T4 en usinage Lubrifié

Figure 4.7 Contours de la surface de réponse estimée pour les contraintes résiduelles

Avec :

- Contraintes résiduelles en MPa;
- Rayon du bec outil en mm; Avance en mm/tr.

Rapport-Gratuit.com

4.3 Modélisation des équations de prédiction des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont modélisées pour un intervalle de confiance de 95% grâce à un plan factoriel multi-niveau qui tient compte de l'avance et du rayon du bec de l'outil comme facteurs à trois niveaux. La modélisation est faite pour les deux matériaux, à savoir le 2024-T4 et le 6061-T6, et ce pour chaque mode de lubrification S, MQL et L.

Avec :

- Rayon du bec outil $R_\varepsilon \in [0.2, 0.8][\mathrm{mm}]$;
- Avance $\mathrm{f} \in [0.05, 0.15][\mathrm{mm/tr}]$.

4.3.1 Modélisation des contraintes résiduelles pour le 2024-T4

En usinage à sec, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = -456{,}747 + 2965{,}888 * f + 638{,}873 * R_\varepsilon + 370{,}933 * f^2 - 4917{,}72 * f * R_\varepsilon + 303{,}974 * {R_\varepsilon}^2 \quad (4.2)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et celles réelles en usinage sec est présentée dans la figure 4.8.

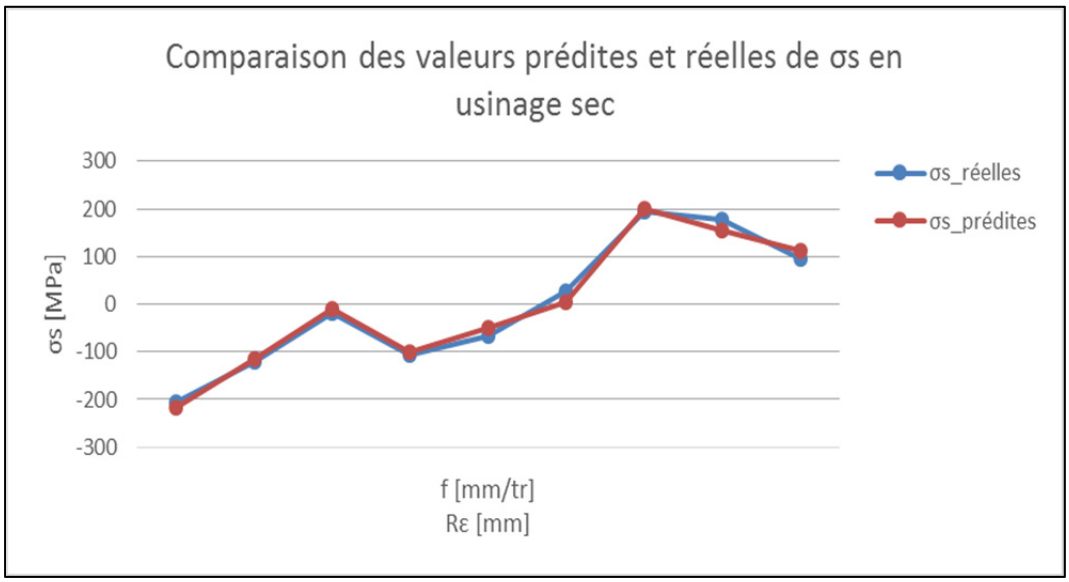


Figure 4.8 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles en usinage à sec pour le 2024-T4

L'erreur, qui est la différence absolue entre chaque valeur prédite et réelle, est de l'ordre de 15%, ce qui est une valeur acceptable.

Avec une quantité minimale de lubrification, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = 597{,}376 - 2078{,}67 * f - 2722{,}18 * R_\varepsilon + 7689{,}99 * f * R_\varepsilon + 1787{,}61 * R_\varepsilon{}^2 \qquad (4.3)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et réelles en usinage MQL est présentée dans la figure 4.9.

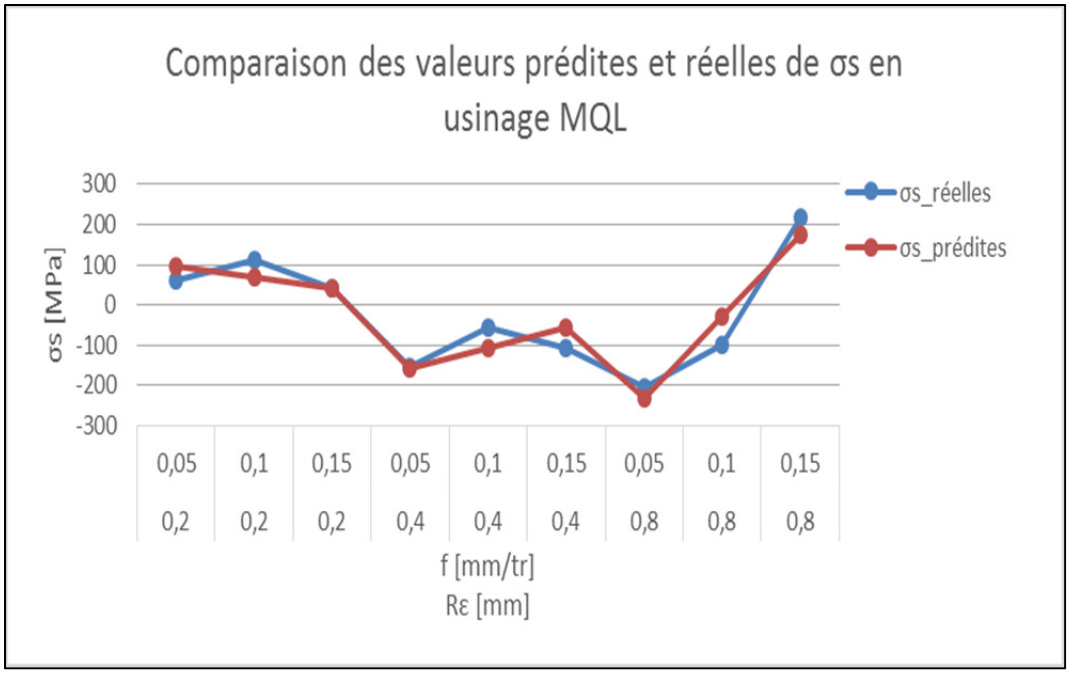


Figure 4.9 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles
en usinage MQL pour le 2024-T4

L'erreur, qui est la différence absolue entre chaque valeur prédite et réelle, est de l'ordre de 5%, ce qui est une valeur acceptable.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

En usinage à lubrification abondante, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = -428{,}12 + 2925{,}24 * f + 683{,}283 * R_\varepsilon - 15058{,}1 * f^2 + 3784{,}28 * f * R_\varepsilon - 574{,}147 * {R_\varepsilon}^2 \quad (4.4)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et réelles est présentée dans la figure 4.10.

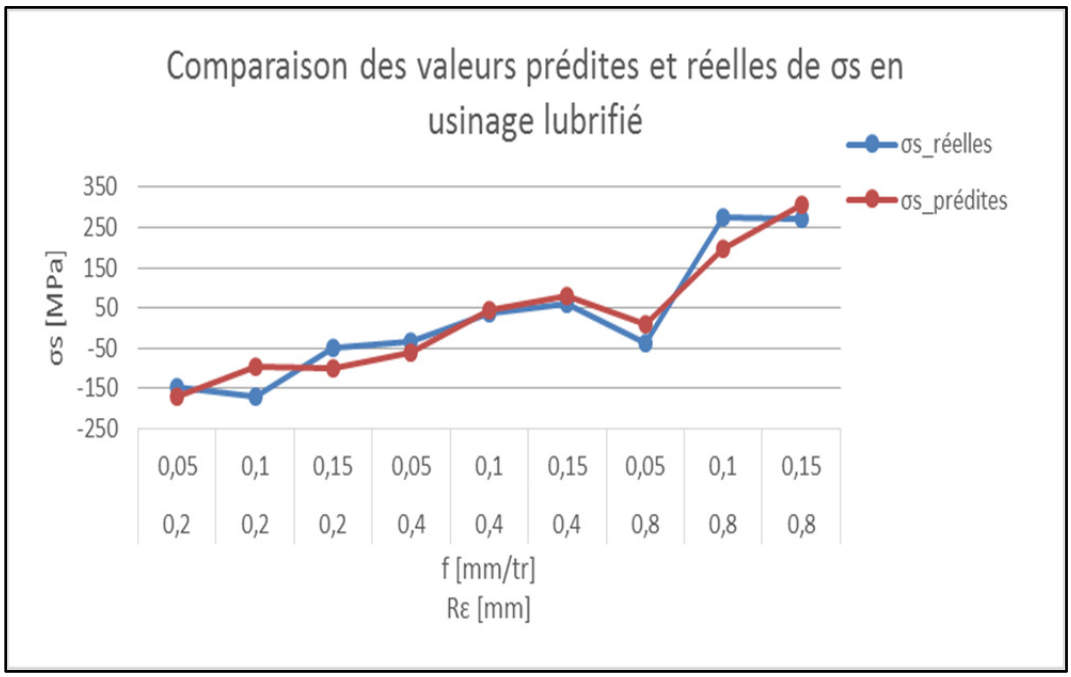


Figure 4.10 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles
en usinage lubrifié pour le 2024-T4

L'erreur est de l'ordre de 13%, ce qui est une valeur acceptable.

4.3.2 Modélisation des contraintes résiduelles pour le 6061-T6

En usinage à sec, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = 145{,}809 - 1422{,}93 * R_\varepsilon + 3824{,}93 * f * R_\varepsilon + 1244{,}14 * {R_\varepsilon}^2 \quad (4.5)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et réelles est présentée dans la figure 4.11.

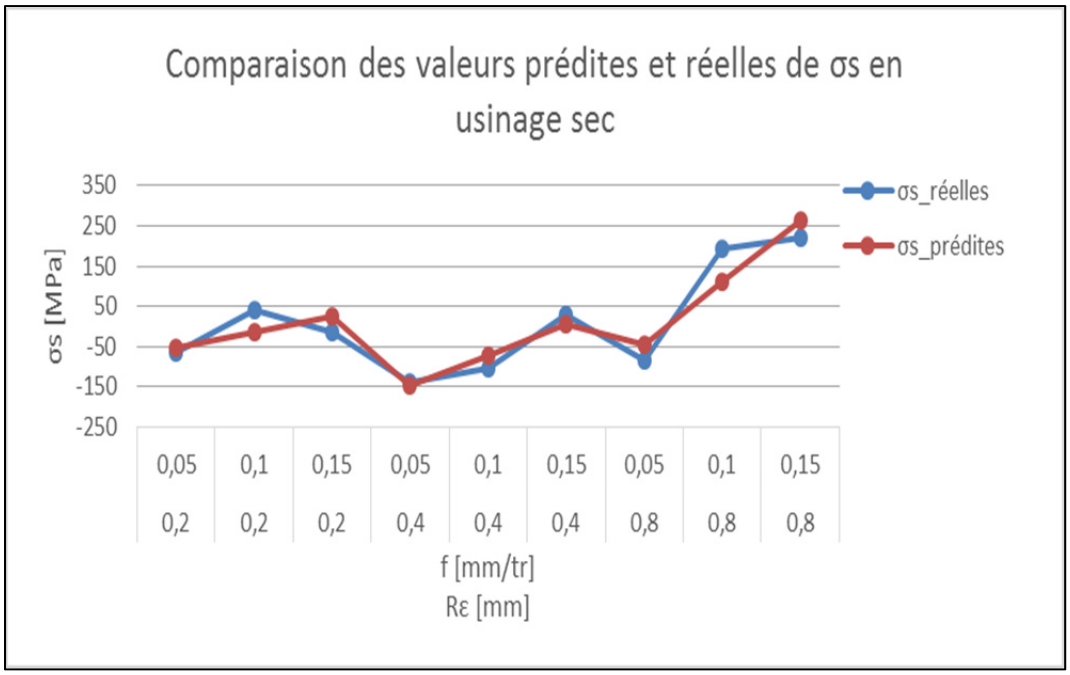


Figure 4.11 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles
en usinage à sec pour le 6061-T6

L'erreur est de l'ordre de 24%, ce qui est une valeur peu acceptable. Il faudra alors envisager une autre sorte de modèle ou une autre série de mesures vu le risque des erreurs expérimentales de mesures ou de calibrage qui ont pu avoir lieu lors des essais.

Avec une quantité minimale de lubrification, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = -23{,}2115 - 342{,}77 * R_\varepsilon + * 3525{,}028 f * R_\varepsilon \qquad (4.6)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et celles réelles est présentée dans la figure 4.12.

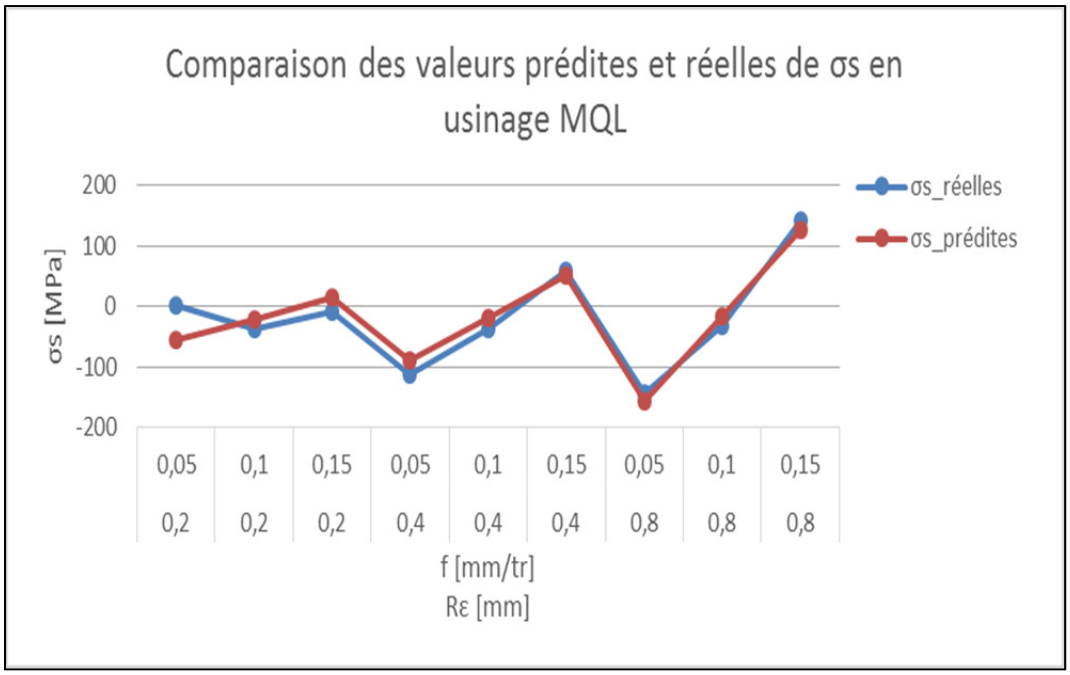


Figure 4.12 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles
en usinage MQL pour le 6061-T6

L'erreur est de l'ordre de 14MPa, ce qui est une valeur acceptable.

En usinage à lubrification abondante, le modèle de prédiction des contraintes résiduelles est :

$$\sigma_s = 224{,}814 - 3266{,}59 * f - 667{,}463 * R_\varepsilon + 19981{,}7 * f^2 - 586{,}461 * f * R_\varepsilon + 714{,}396 * {R_\varepsilon}^2 \quad (4.7)$$

La courbe comparative entre les valeurs prédites et celles réelles est présentée dans la figure 4.13.

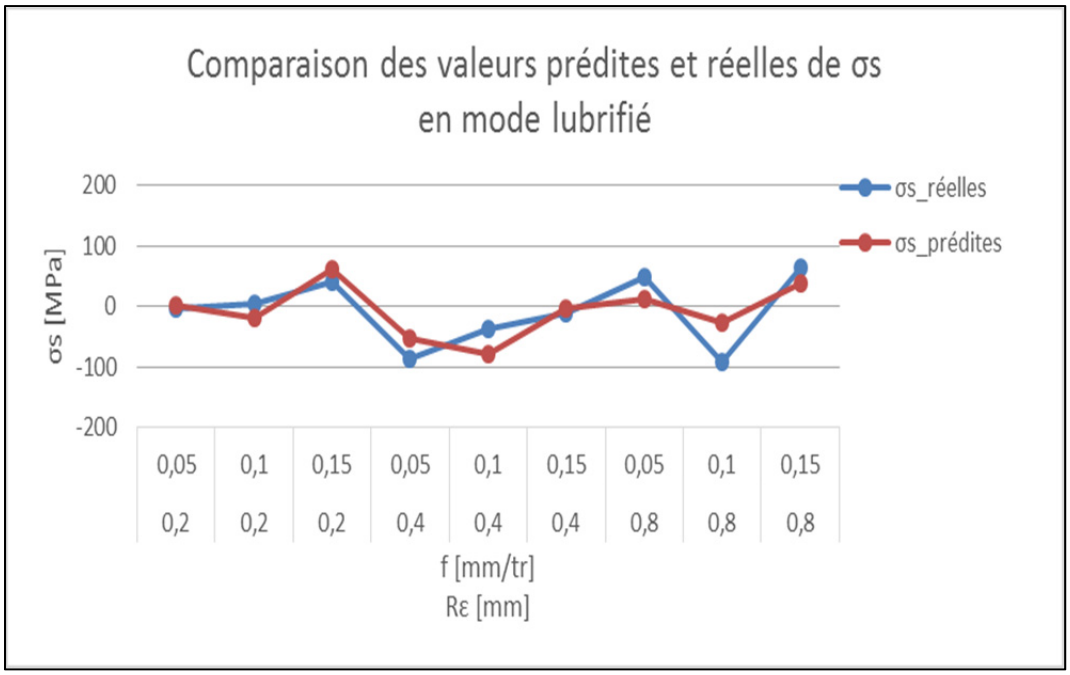


Figure 4.13 Contraintes résiduelles prédites Vs réelles
en usinage lubrifié pour le 6061-T6

L'erreur entre les valeurs et prédites est de l'ordre de 18%, ce qui est une valeur limite peu acceptable pouvant être expliquée par les erreurs qui ont pu avoir lieu lors des mesures ou du calibrage.

4.4 Optimisation des contraintes résiduelles

Une optimisation individuelle est proposée en premier temps pour les contraintes résiduelles pour le 6061-T6 et le 2024-T4 sous différents mode de lubrification suite à la modélisation effectuée. Les résultats optimaux qui tendent le plus à annuler les contraintes résiduelles sont présentés dans les deux tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 Paramètres de coupe optimaux en usinage S, MQL et L du 2024-T4

Matériau	**Al 2024-T4**		
Mode de lubrification	**S**	**MQL**	**L**
Avance optimale (mm/tr)	0,0620411	0,0518641	0,0588855
Rayon du bec de l'outil optimum (mm)	0,513625	0,264576	0,495681

Avec :

- Rayon du bec outil $\in [0.2, 0.8][\mathrm{mm}]$;
- Avance $\in [0.05, 0.15][\mathrm{mm/tr}]$.

Tableau 4.2 Paramètres de coupe optimaux en usinage S, MQL et L du 6061-T6

Matériau	**Al 6061-T6**		
Mode de lubrification	**S**	**MQL**	**L**
Avance optimale (mm/tr)	0,0523798	0,149339	0,0502575
Rayon du bec de l'outil optimum (mm)	0,252978	0,227874	0,200735

Une optimisation multi réponse des contraintes résiduelles est effectuée pour les deux matériaux étudiés dans cette partie.

La valeur optimale de la désirabilité globale est de 0,93. Le tableau 4.3 résume les résultats pour une avance optimale de 0,13 mm/tr et un rayon du bec de l'outil de 0,28mm.

Tableau 4.3 Réponses optimales des contraintes résiduelles

Réponse	**Optimum**	**Désirabilité individuelle**
Contraintes 2024S	-26,1869	0,9394
Contraintes 2024MQL	-17,3674	1.0000
Contraintes 2024L	-13,7225	1.0000
Contraintes 6061S	-8,60395	0,93728
contraintes 6061MQL	0,000135496	0,91868
contraintes 6061L	$-8{,}3824.10^{-7}$	0,911554

Avec :

- Rayon du bec outil $\in [0.2, 0.8][\mathrm{mm}]$;
- Avance $\in [0.05, 0.15][\mathrm{mm/tr}]$.

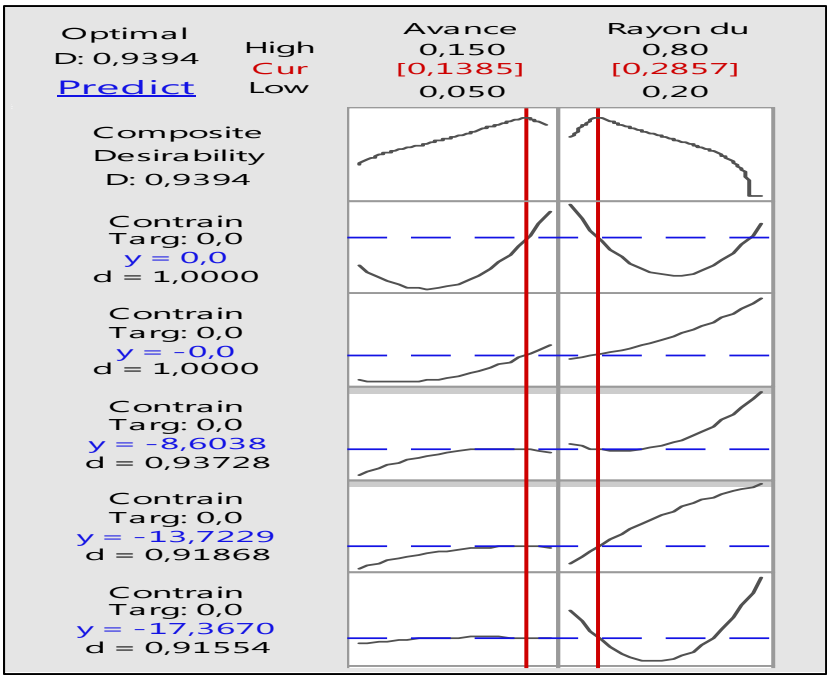


Figure 4.14 Graphique de la désirabilité pour une optimisation multi réponses des contraintes résiduelles

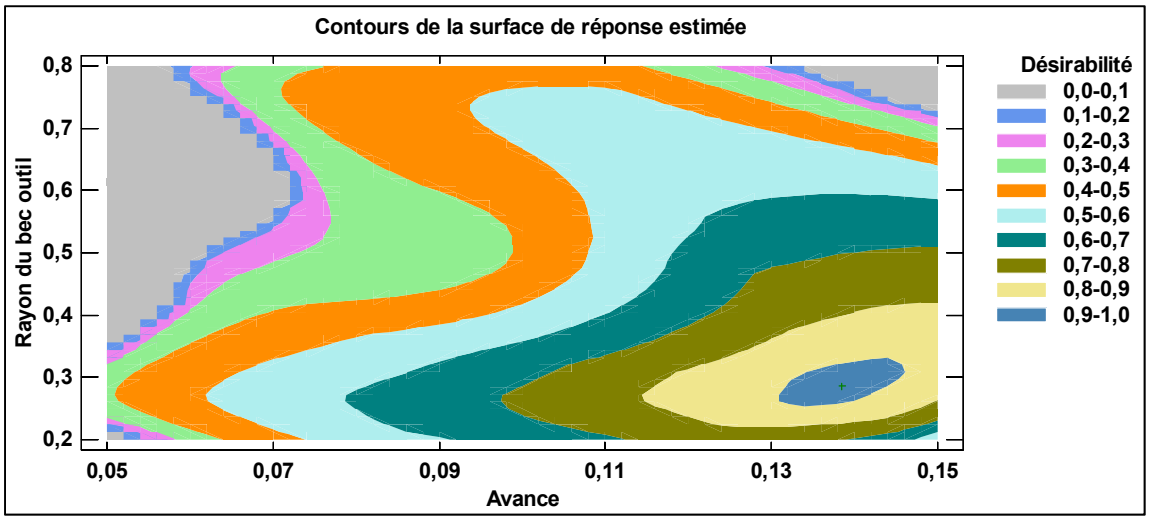


Figure 4.15 Contour de la surface de réponse estimée pour la désirabilité

Avec :

- Rayon du bec outil ∈ [0.2, 0.8][mm];
- Avance ∈ [0.05, 0.15][mm/tr].

D'après le graphique 4.15 de la surface de réponse estimée pour la désirabilité, on a pu constater que la désirabilité globale est à son maximum pour les avances les plus élevées (f entre 0,13 et 0,15 m m/tr) et pour les rayons du bec les plus faibles (R_ε entre 0,2 et 0,3mm).

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les effets de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil sur les contraintes résiduelles de surface de pièces en Al2024-T4 et Al6061-T6 selon différents modes de lubrification. Suite à une analyse Pareto et une analyse des effets directs et interactions, on a constaté que seuls l'avance et le rayon du bec de l'outil influent considérablement sur les contraintes résiduelles et que le matériau et le mode de lubrification n'ont pas une contribution significative, même avec le fait que le mode MQL se distinguait légèrement des autres modes S et L présentant les plus faibles valeurs des contraintes résiduelles, majoritairement avec une tendance compressive. La tendance des contraintes résiduelles a été expliquée par la compétition qui peut exister entre les phénomènes thermiques et mécaniques dans la zone de coupe générant des contraintes de traction ou de compression selon que l'un ou l'autre des phénomènes l'emporte. Des modèles de prédiction ont été proposés suite auxquels une optimisation individuelle et une optimisation globale ont été proposées en se basant sur la notion de la fonction de désirabilité dans le but de minimiser au maximum la présence de contraintes, que ce soit de compression ou de traction.

Dans le chapitre qui suit, le comportement en traction des pièces usinées sera présenté.

CHAPITRE 5

RÉSISTANCE À LA TRACTION

5.1 Introduction

L'essai de traction, qui est généralement utilisé pour caractériser le comportement mécanique des métaux, permet de sélectionner un matériau pour des applications différentes afin de contrôler la qualité et de prédire comment un matériau réagira sous d'autres types de forces.

Les principales propriétés directement collectées des courbes de traction générées suite aux essais sont la résistance à la rupture R_m, la limite d'élasticité ou résistance élastique R_e et la résistance ultime UTS.

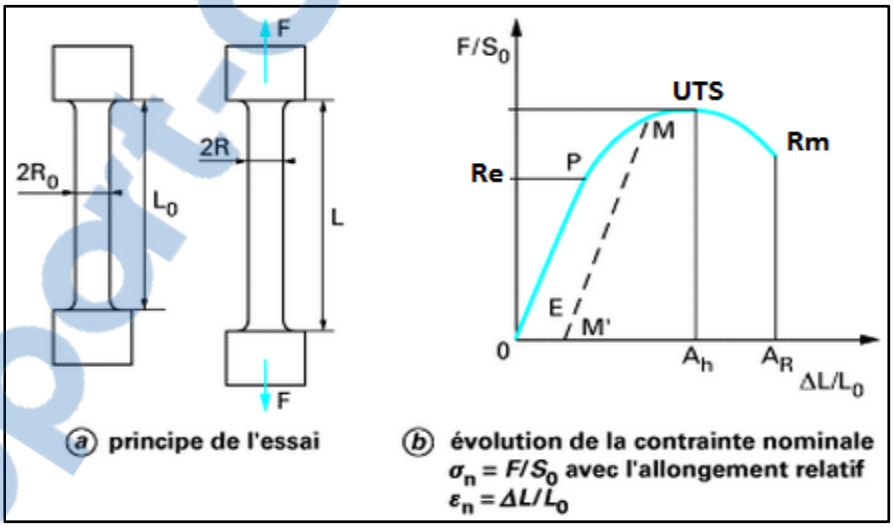


Figure 5.1 Essai de traction uniaxiale
(Tirée de Felder, 2007)

Dans cette partie, nous étudions les effets des conditions de coupe et des modes de lubrification sur la résistance à la traction des éprouvettes usinées en tournage suite à leur soumission à des tests de traction uniaxiale. Le but principal étant de prévoir le comportement des éprouvettes en fonction de leurs conditions d'élaboration, des modèles de prédictions seront présentés de la résistance ultime et de la résistance à la rupture en fonction

Rapport-Gratuit.com

de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil, et une étude des effets de la rugosité de surface et des contraintes résiduelles sera aussi présentée en bref.

5.2 Analyse des résultats

Des tests de traction monotone ont été réalisés sur une machine de traction MTS 810. L'usage d'un extensomètre axial à pince MTS 634 12E-25 a permis de recueillir les données relatives à l'allongement et à la charge du système, permettant ainsi de générer les courbes de traction.

Les essais ont été pilotés à une vitesse de déplacement de traverse constante égale à 0,008mm/s et à température ambiante. La section de l'éprouvette dans sa partie calibrée est de 31,65 mm^2. L'essai est considéré comme quasi statique.

L'objectif de ces essais est de mesurer la force qui provoque la rupture de chaque éprouvette, ce qui va permettre de calculer les valeurs des contraintes et de les comparer entre elle en fonction des conditions de coupe, et ce pour chaque matériau sous différents modes de lubrification..

Toutes les déterminations faites portent sur une partie de la longueur de l'éprouvette. Les têtes des éprouvettes ont une section supérieure à celle de la partie cylindrique et ne subissent aucune déformation plastique.

L'éprouvette est fixée par ses têtes, entre deux mors et est soumise à un effort de traction suivant son axe. L'extensomètre est fixé sur deux points d'attache définissant une distance de base pareille pour toutes les éprouvettes durant les tests.

Des courbes de traction sélectionnées sont présentées dans l'annexe XVI mettant en évidence les différences existantes entre les 3 matériaux de l'étude sous différentes conditions d'usinage et modes de lubrification.

De ces courbes de traction, on a pu dégager les valeurs de la contrainte élastique R_e, la contrainte ultime UTS et la contrainte à la rupture R_m pour chaque éprouvette testée. Les valeurs sont présentées dans l'annexe XIII. Nous avons étudié, pour chaque matériau, les effets des conditions de coupe et des modes de lubrification sur les contraintes dont les valeurs sont expérimentales et proviennent des courbes de traction générées.

On a commencé par une étude globale des effets des matériaux, des modes de lubrification, du rayon du bec de l'outil et de l'avance sur les contraintes ultimes, les limites élastiques et les contraintes à la rupture.

Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 montrent que les modes de lubrification, le rayon du bec de l'outil et la vitesse d'avance n'ont pratiquement pas d'effet ni sur la contrainte ultime, ni sur la limite d'élasticité, ni sur la contrainte la rupture. Seul le matériau influe sur les réponses. De même, d'après le graphique des interactions, nous constatons que les différents matériaux présentent le même comportement en traction pour les différents modes de lubrification (figures 5.5, 5.6 et 5.7).

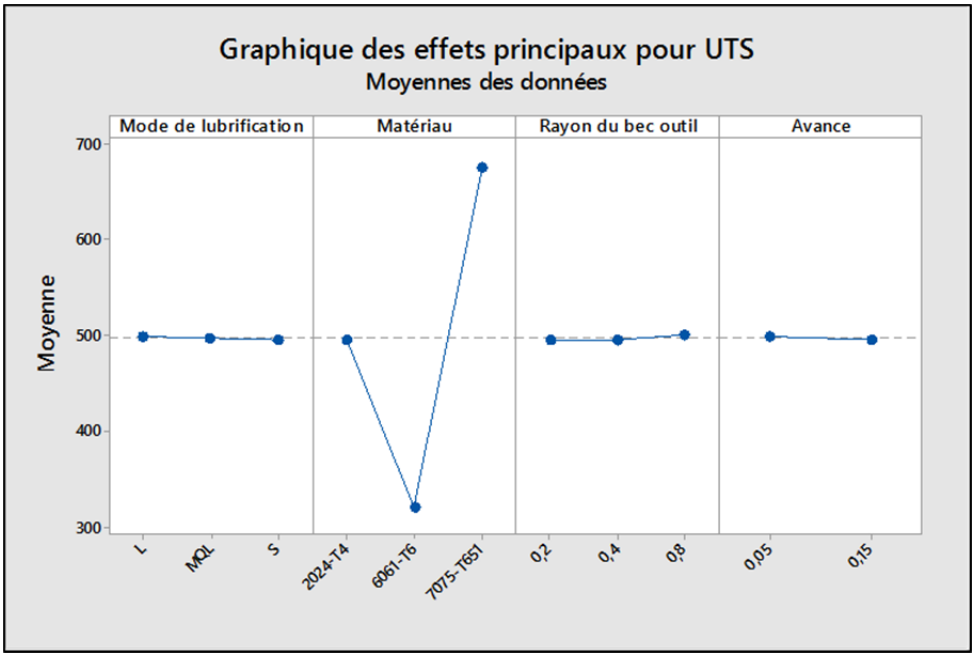


Figure 5.2 Effets directs pour UTS

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

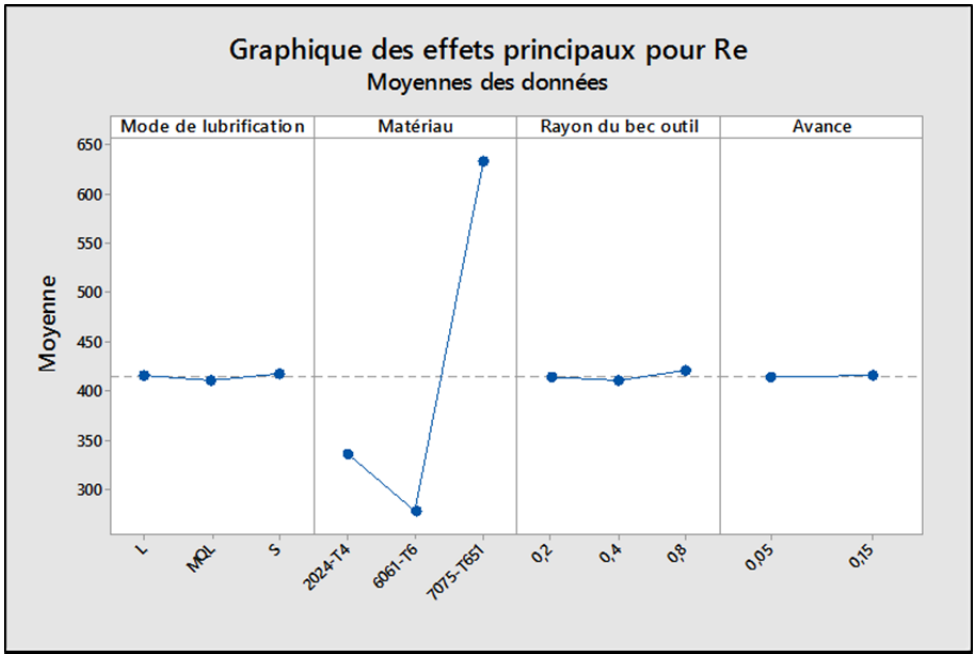


Figure 5.3 Effets directs pour Re

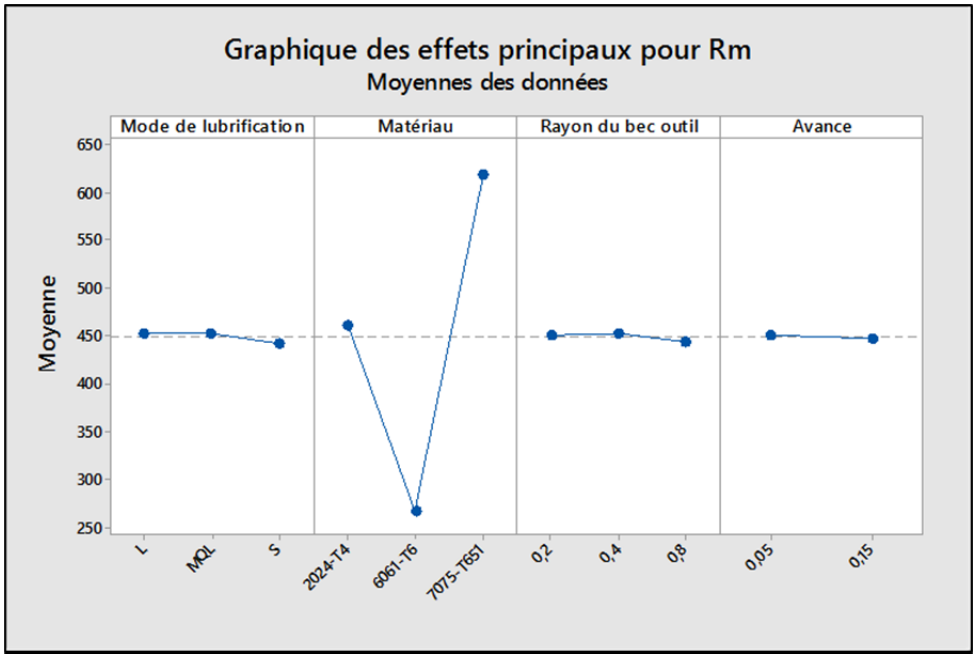


Figure 5.4 Effets directs pour Rm

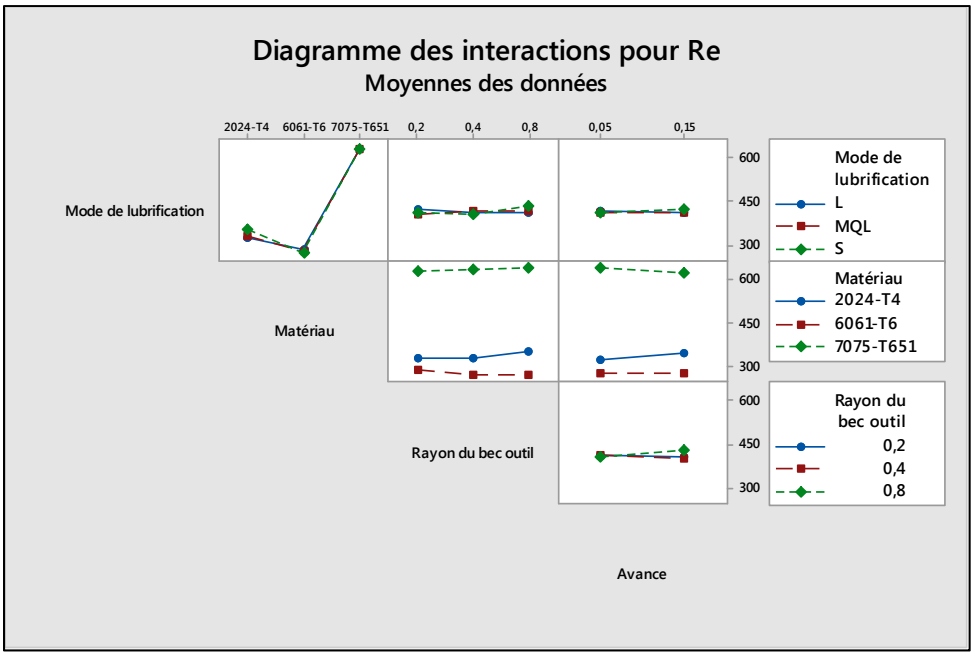


Figure 5.5 Interactions pour Re

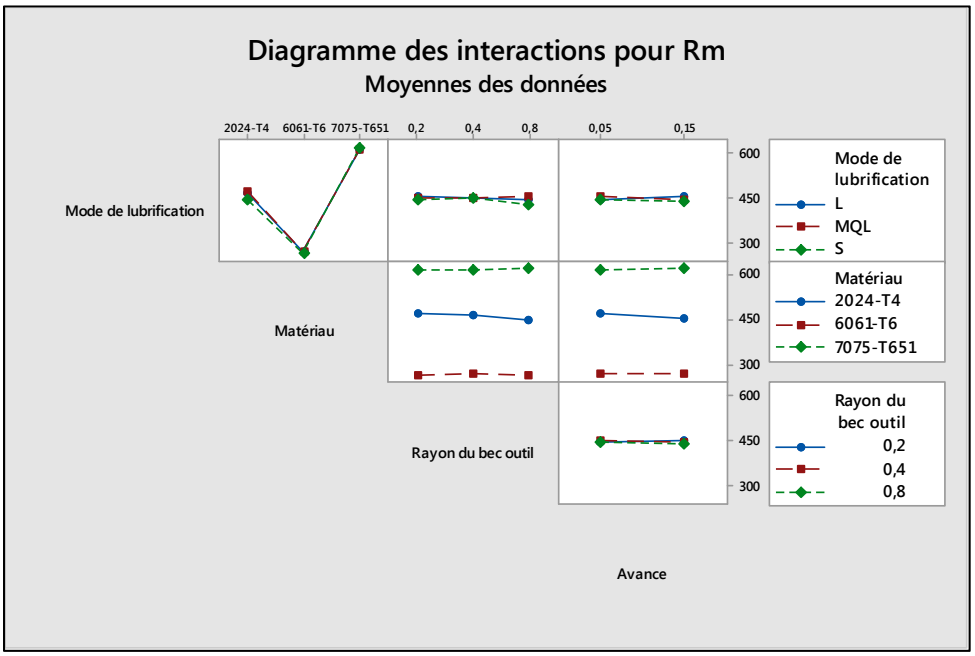


Figure 5.6 Interactions pour Rm

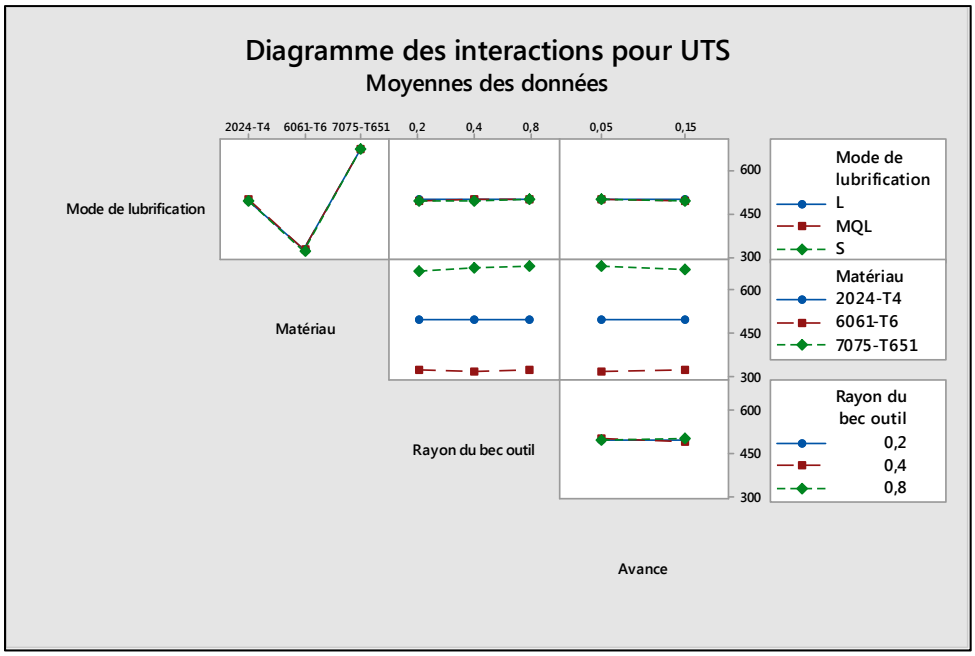


Figure 5.7 Interactions pour UTS

5.2.1 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes ultimes

Dans les figures 5.8 et 5.9, nous constatons que le 2024-T4 et le 6061-T6 se comportent d'une manière quasi-similaire du point de vue contraintes ultimes UTS. Pour ces deux matériaux, les valeurs des contraintes ultimes augmentent d'une façon linéaire et proportionnelle avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Les valeurs les plus élevées des contraintes ultimes ont été enregistrées pour les plus grandes valeurs des avances (f = 0,15). Encore, avec le rayon du bec de l'outil le plus faible (R_ε = 0,2), nous avons pu enregistrer les contraintes ultimes les plus élevées pour les deux mêmes matériaux. Les valeurs les plus faibles des contraintes ultimes sont enregistrées pour le rayon moyen (R_ε = 0,4). Pour ce qui est des modes de lubrification, l'usinage à quantité minimale de lubrification a présenté les meilleures valeurs des contraintes ultimes suivi de l'usinage à lubrification abondante. La seule différence entre les deux matériaux est que le 2024-T4 présente un meilleur pic de contraintes.

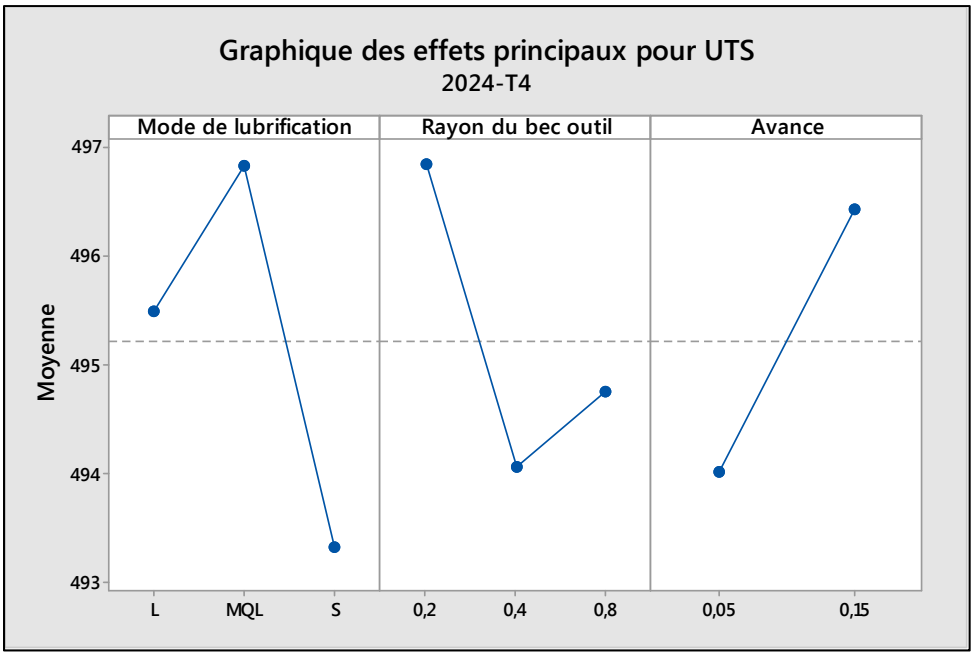


Figure 5.8 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 2024-T4

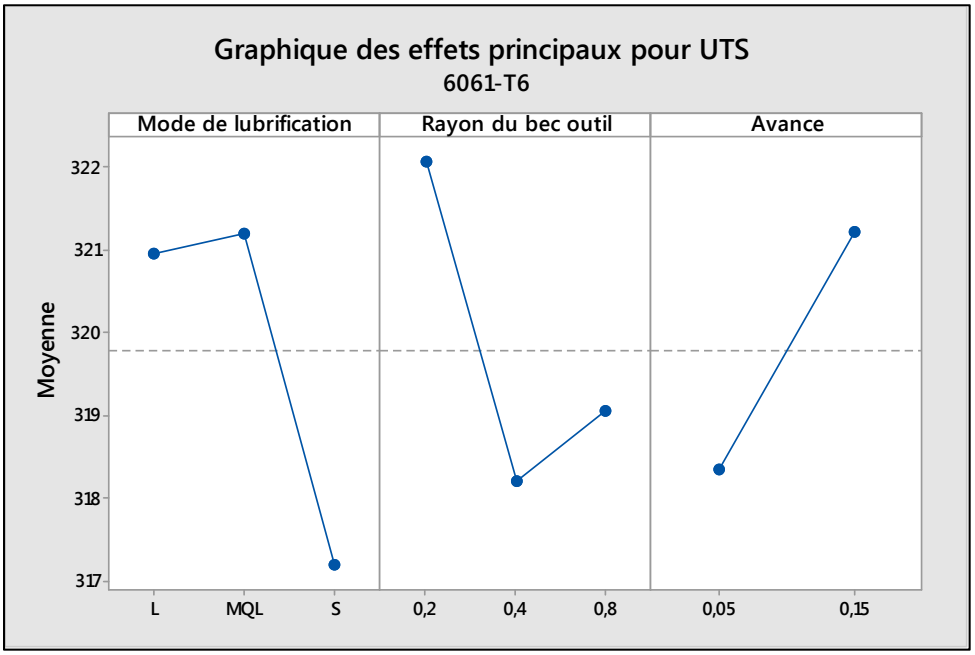


Figure 5.9 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 6061-T6

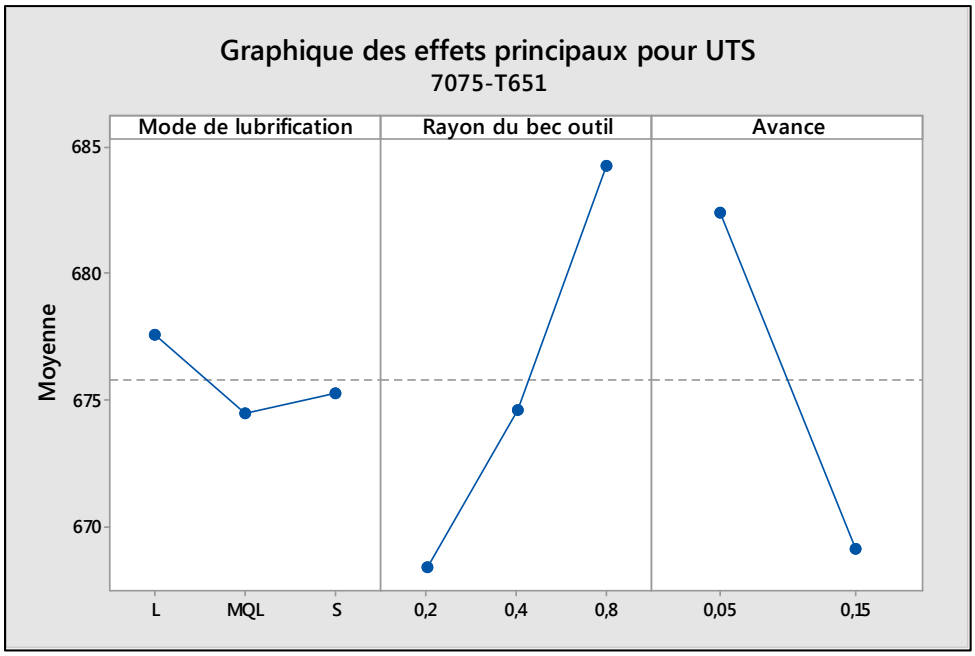


Figure 5.10 Effets principaux des conditions de coupe sur UTS pour le 7075-T651

Pour ce qui est du matériau 7075-T651, la figure 5.10 présente un comportement différent des deux autres matériaux. Le mode de lubrification n'a pas d'influence significative et, contrairement à ce qui a été observé pour les autres matériaux, la lubrification à quantité minimale présente les plus faibles valeurs de la résistance ultime mais les meilleures valeurs pour l'usinage à lubrification abondante. Encore, la variation de la résistance ultime est proportionnelle au rayon de l'outil. Plus le rayon augmente, plus UTS augmente. Cependant, la résistance ultime varie d'une façon linéaire avec la vitesse d'avance et d'une façon inversement proportionnelle. Les plus fortes valeurs de la résistance ultime ont été enregistrées pour les rayons d'outil les plus grands et pour les vitesses d'avance les plus faibles.

Les figures 5.11, 5.12 et 5.13 des effets des interactions sur la résistance ultime UTS ont montré que les effets sont différents sur le 7075-T6 que sur les deux autres matériaux, qui présentent un comportement semblable, à part certaines différences enregistrées. Pour ces deux matériaux, le mode MQL a enregistré les plus fortes valeurs des contraintes ultimes, sauf pour le niveau le plus haut de l'avance (f = 0,15), où la lubrification abondante a

présenté sa plus grande valeur. Pour ce qui est de l'interaction entre le rayon de l'outil et le mode de lubrification, le mode MQL a présenté les plus grandes valeurs des contraintes, sauf pour les rayons les plus faibles (R_ε = 0,2), où le mode L s'est distingué par les plus fortes valeurs des contraintes. Toujours, pour les matériaux 2024 et 6061, le mode S a présenté les plus faibles valeurs des UTS, que ce soit par son effet direct ou par les interactions avec le reste des facteurs que l'on voit dans les figures 5.11 et 5.12. La différence la plus remarquable entre le comportement des deux matériaux est que, pour les rayons moyens (R_ε = 0,4), c'est le mode L qui présente les plus faibles contraintes ultimes pour le 2024, contrairement au 6061 qui présente les plus faibles contraintes en usinage à sec.

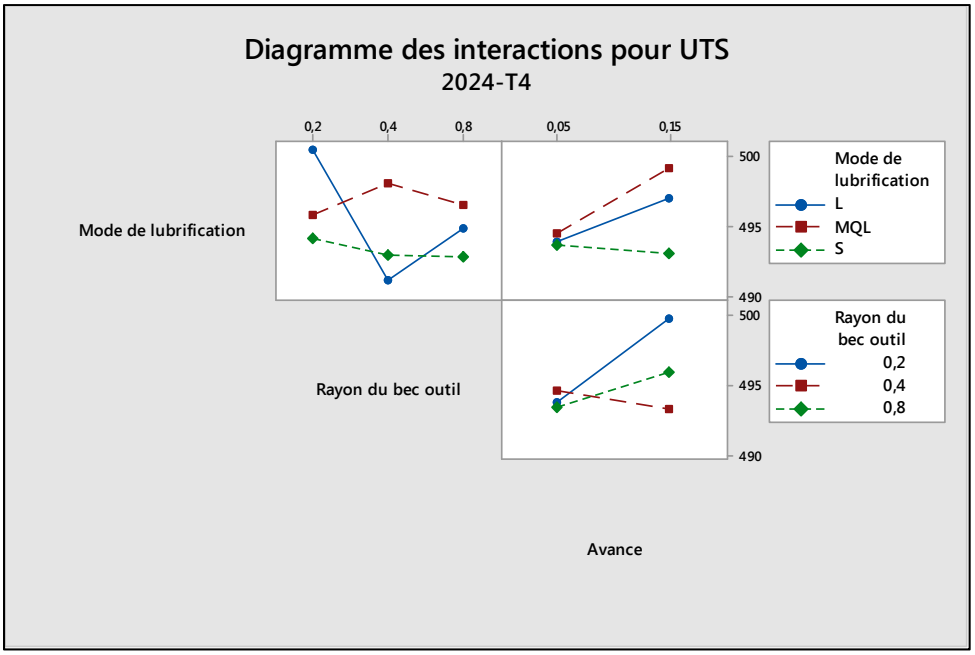


Figure 5.11 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 2024-T4

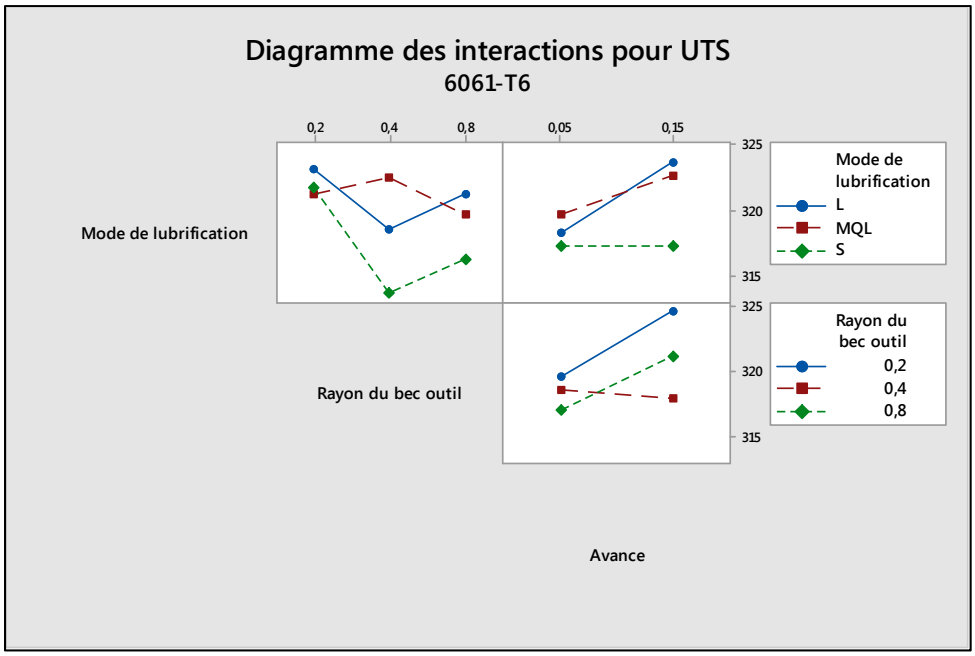


Figure 5.12 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 6061-T6

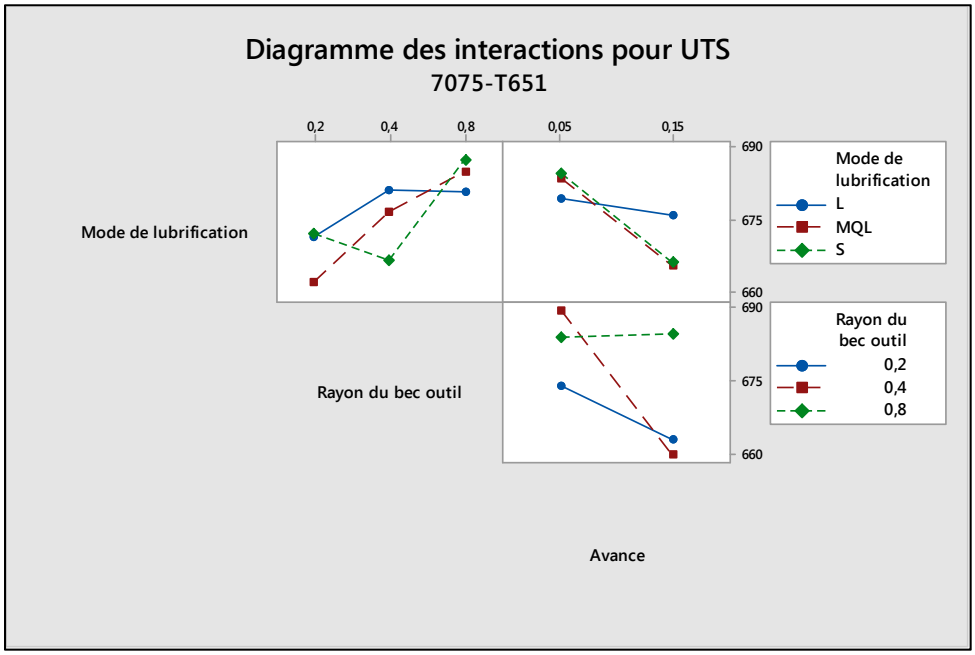


Figure 5.13 Diagramme des effets des interactions pour UTS pour le 7075-T651

La figure 5.13 présente l'effet des interactions sur les contraintes ultimes pour le 7075-T651. La lubrification abondante a présenté les meilleurs résultats pour les plus grands ayons du bec de l'outil et les plus faibles avances. L'usinage S et MQL ont présenté le même comportement Les plus grandes valeurs sont enregistrées pour les avances et les rayons du bec de l'outil les plus faibles.

Dans les chapitres 3 et 4, il a été constaté que les contraintes résiduelles ont plus tendance à être des contraintes de traction avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil et de la vitesse d'avance, et que la rugosité de surface enregistre les plus grandes valeurs pour les avances les plus élevées et les rayons du bec de l'outil les plus faible. Encore, les meilleures valeurs de la rugosité et les plus faibles valeurs des contraintes résiduelles ont été enregistrées pour l'usinage à quantité minimale de lubrification. Ceci peut expliquer le comportement de la résistance ultime qui présente des valeurs minimales pour les rugosités et les contraintes résiduelles les plus élevées étant donné que l'amorçage des fissures se fait généralement en surface.

5.2.2 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes à la rupture Rm

Les graphiques des effets principaux et des interactions sur les contraintes à la rupture R_m sont présentée dans l'annexe XIV.

Pour ce qui est des graphiques d'effets principaux, pour le 7075-T651 se distingue par son comportement. Les valeurs des contraintes à la rupture augmentent d'une façon linéaire et proportionnelle par rapport à la vitesse d'avance qui, pour ses plus grandes valeurs, on a enregistré les plus grandes valeurs de R_m. Le même comportement est observé pour le rayon de l'outil qui, plus il diminue de rayon, moins sont les valeurs des contraintes à la rupture. Encore, le mode de lubrification MQL a présenté les meilleures valeurs des contraintes ultimes.

Rapport-Gratuit.com

Pour le 2024-T4 et le 6061-T6, plus le rayon du bec de l'outil et la vitesse d'avance diminuent, plus la résistance à la traction est meilleure. De plus, le mode MQL a présenté les valeurs les plus élevées des contraintes suivi de l'usinage à lubrification abondante.

5.2.3 Étude des effets principaux et des interactions sur les contraintes élastiques Re

Les graphiques des effets principaux et des interactions sur les contraintes élastiques Re sont présentés dans l'annexe XV.

D'après les graphiques des effets directs, nous constatons que la limite élastique augmente avec l'usage de la lubrification en usinage (avec des valeurs optimales pour la MQL) et qu'elle diminue avec l'augmentation du rayon de l'outil et l'augmentation de l'avance pour le 2024-T4 et le 6061-T6. De plus, il a été conclu dans le chapitre 4 de cette étude que les contraintes résiduelles augmentent avec l'accroissement de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil. Hors, une fois que la pièce est sollicitée en traction, les valeurs des contraintes résiduelles viennent s'ajouter aux contraintes appliquées pouvant excéder imprévisiblement la limite élastique du matériau et créer alors une détérioration précoce de la pièce. Il est alors logique que les limites élastiques mesurées diminuent avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil et de l'avance.

Cependant, pour le 7075-T651, un comportement différent est observé pour la limite élastique qui augmente avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil et la diminution de la vitesse d'avance. Sa valeur optimale est observée pour les éprouvettes usinées avec une lubrification abondante.

La plus importante information que l'on peut tirer des diagrammes des interactions est que, pour le 2024-T4, l'usinage à lubrification abondante se distingue des autres modes de lubrification puisque la limite d'élasticité augmente considérablement avec la diminution du bec de l'outil et l'augmentation de la vitesse d'avance. Pour le 6061-T6, le meilleur résultat

est enregistré pour l'usinage à quantité minimale de lubrification pour le rayon du bec de l'outil moyen.

5.3 Modélisation des équations de prédiction des contraintes à la traction

Les contraintes élastiques Re, les contraintes de rupture Rm et les contraintes ultimes UTS à la traction sont modélisées pour un intervalle de confiance de 95% grâce à un plan factoriel multi-niveau qui tient en considération l'avance et le rayon du bec de l'outil comme facteurs significatifs. La modélisation est faite pour les trois matériaux, à savoir le 2024-T4, le 6061-T6 et le 7075-T651, et ce pour chacun des modes de lubrification S, MQL et L.

Les équations de prédictions des différentes contraintes sont présentées dans les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3. Les modèles retenus ont présenté des pourcentages d'erreurs relatives très satisfaisants variant entre 0,01% et 1,69%.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 5.1 Équations de prédictions des limites élastiques

Matériau	MDL	Équations de prédiction des limites élastiques Re (MPa)	Erreur (%)
2024-T4	**S**	$Ln(R_e) = 5{,}8028 - 0{,}0408 * R_\varepsilon - 0{,}084f + 0{,}0113 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}053 * R_\varepsilon * f$	1,69
	MQL	$Ln(R_e) = 5{,}7774 - 0{,}0118 * R_\varepsilon + 0{,}091 * f + 0{,}0113 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}053 * R_\varepsilon * f$	0,01
	L	$Ln(R_e) = 5{,}8345 - 0{,}308 * R_\varepsilon - 0{,}194 * f + 0{,}213 * {R_\varepsilon}^2 + 1{,}161 * R_\varepsilon * f$	0,02
6061-T6	**S**	$Ln(R_e) = 5{,}713 - 0{,}339 * R_\varepsilon - 0{,}945 * f + 0{,}194 * {R_\varepsilon}^2 + 1{,}47 * R_\varepsilon * f$	0,06
	MQL	$Ln(R_e) = 5{,}5028 + 0{,}438 * R_\varepsilon + 0{,}235 * f - 0{,}422 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}067 * R_\varepsilon * f$	0,02
	L	$Ln(R_e) = 5{,}524 + 0{,}061 * R_\varepsilon + 0{,}977 * f + 0{,}059 * {R_\varepsilon}^2 - 1{,}226 * R_\varepsilon * f$	0,02
7075-T651	**S**	$Ln(R_e) = 6{,}5319 - 0{,}246 * R_\varepsilon - 0{,}525 * f + 0{,}237 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}429 * R_\varepsilon * f$	0,02
	MQL	$Ln(R_e) = 6{,}413 + 0{,}207 * R_\varepsilon - 0{,}156 * f - 0{,}114 * {R_\varepsilon}^2 - 0{,}3 * R_\varepsilon * f$	0,2
	L	$Ln(R_e) = 6{,}4774 + 0{,}0571 * R_\varepsilon - 0{,}6348 * f - 0{,}1592 * {R_\varepsilon}^2 + 1{,}243 * R_\varepsilon * f$	0,01

Avec :

- $R_\varepsilon \in [0.2, 0.8]$[mm];
- f ∈ [0.05, 0.15][mm/tr].

Tableau 5.2 Équations de prédiction des contraintes à la rupture

Matériau	**MDL**	**Équations de prédiction des contraintes à la rupture Rm (MPa)**	**Erreur (%)**
2024-T4	**S**	$R_m = 487{,}5 - 141{,}8 * R_\varepsilon - 3{,}5 * f + 136{,}2 * {R_\varepsilon}^2 + 228 * R_\varepsilon * f$	0,29
	MQL	$R_m = 487{,}4 + 10{,}7 * R_\varepsilon - 124{,}5 * f - 6{,}8 * {R_\varepsilon}^2 + 57 * R_\varepsilon * f$	0,14
	L	$R_m = 465{,}6 - 10{,}6 * R_\varepsilon + 71{,}1 * f - 6{,}8 * {R_\varepsilon}^2 + 57 * R_\varepsilon * f$	0,06
6061-T6	**S**	$R_m = 207{,}8 + 170{,}4 * R_\varepsilon + 132{,}1 * f - 152{,}8 * {R_\varepsilon}^2 + 44 * R_\varepsilon * f$	0,02
	MQL	$R_m = 280{,}2 + 5{,}3 * R_\varepsilon - 180{,}4 * f - 6{,}8 * {R_\varepsilon}^2 + 57 * R_\varepsilon * f$	0,09
	L	$R_m = 276{,}9 - 43 * R_\varepsilon + 182 * f + 56 * {R_\varepsilon}^2 - 472 * R_\varepsilon * f$	0,12
7075-T651	**S**	$R_m = 596{,}3 - 11{,}5 * R_\varepsilon + 290{,}9 * f + 61{,}6 * {R_\varepsilon}^2 - 407 * R_\varepsilon * f$	0,01
	MQL	$R_m = 619{,}6 + 34 * R_\varepsilon - 62 * f - 12 * {R_\varepsilon}^2 - 162 * R_\varepsilon * f$	0,02
	L	$R_m = 619{,}5 - 13{,}9 * R_\varepsilon - 104{,}3 * f - 63{,}5 * {R_\varepsilon}^2 + 704 * R_\varepsilon * f$	0,01

Avec :

- $R_\varepsilon \in [0.2, 0.8]$[mm];
- f ∈ [0.05, 0.15][mm/tr].

Tableau 5.3 Équations de prédictions des contraintes ultimes

Matériau	MDL	Équations de prédiction des contraintes ultimes UTS (MPa)	Erreur (%)
2024-T4	S	$-UTS^{-0.5} = -0{,}044498 - 0{,}00178 * R_\varepsilon - 0{,}00176 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,01
	MQL	$-UTS^{-0.5} = -0{,}044614 - 0{,}00157 * R_\varepsilon + 0{,}00001 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,01
	L	$-UTS^{-0.5} = -0{,}044728 - 0{,}00185 * R_\varepsilon + 0{,}00182 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,01
6061-T6	S	$-UTS^{-0.5} = -0{,}055664 - 0{,}002 * R_\varepsilon - 0{,}00036 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,01
	MQL	$-UTS^{-0.5} = -0{,}055583 - 0{,}00180 * R_\varepsilon + 0{,}00142 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,04
	L	$-UTS^{-0.5} = -0{,}055660 - 0{,}00207 * R_\varepsilon + 0{,}00323 * f + 0{,}00135 * {R_\varepsilon}^2 + 0{,}00227 * R_\varepsilon * f$	0,02
7075-T651	S	$UTS^{0.5} = 26{,}795 - 2{,}49 * R_\varepsilon - 5{,}61 * f + 2{,}64 * {R_\varepsilon}^2 + 4{,}31 * R_\varepsilon * f$	0,01
	MQL	$UTS^{0.5} = 25{,}52 + 2{,}64 * R_\varepsilon - 1{,}92 * f - 1{,}58 * {R_\varepsilon}^2 - 3{,}3 * R_\varepsilon * f$	0,02
	L	$UTS^{0.5} = 26{,}361 + 0{,}37 * R_\varepsilon - 7{,}68 * f - 1{,}576 * {R_\varepsilon}^2 + 15{,}07 * R_\varepsilon * f$	0,02

Avec :

- $R_\varepsilon \in [0.2, 0.8]$[mm];
- f ∈ [0.05, 0.15][mm/tr].

Les figures 5.14, 5.15 et 5.16 illustrent le comportement des limites élastiques, des résistances à la rupture et des contraintes ultimes entre leurs valeurs réelles et prédites pour le matériau 2024-T4 en usinage à sec, à quantité minimale de lubrification et à lubrification abondante.

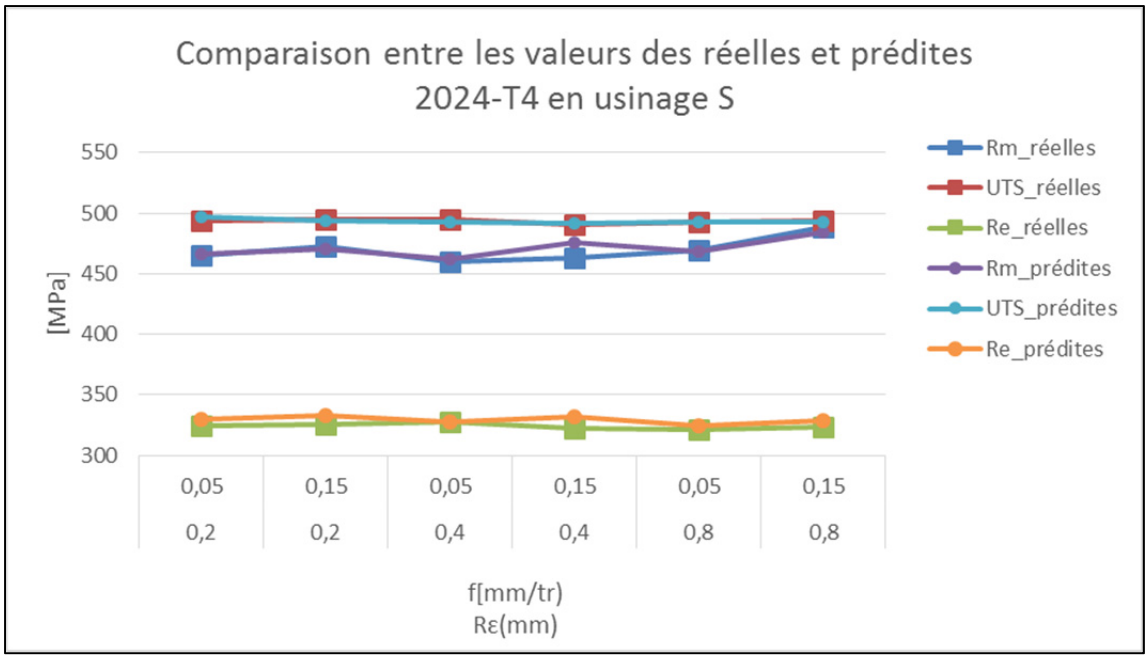


Figure 5.14 Contraintes réelles Vs prédites pour le 2024-T4 en usinage à sec

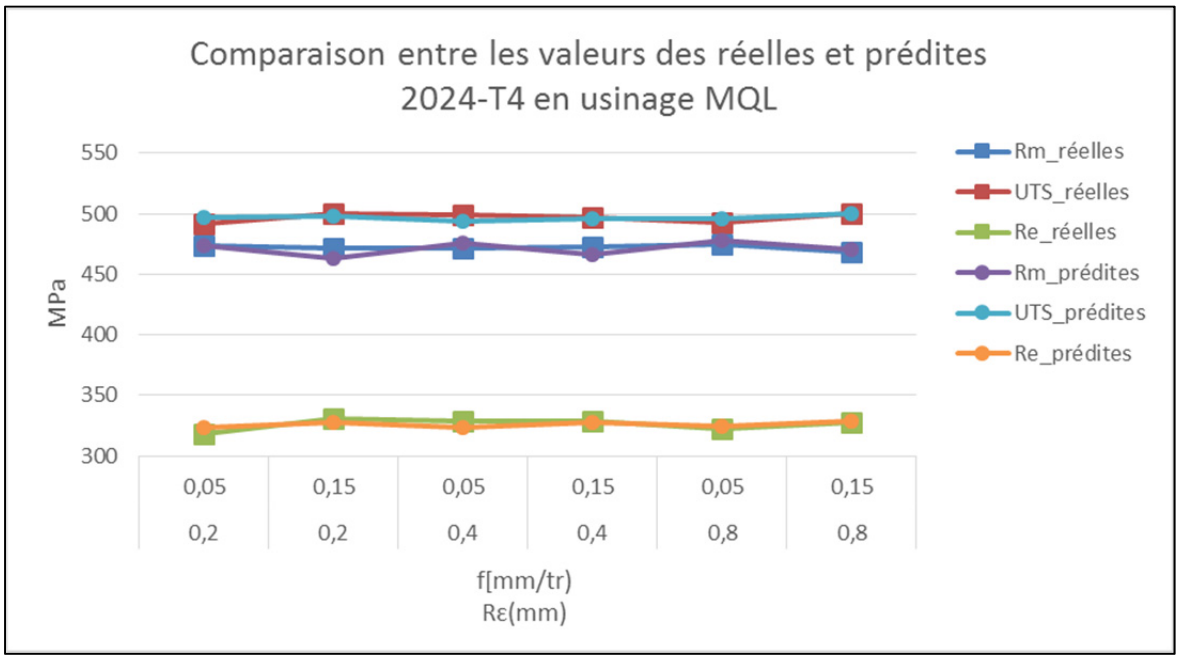


Figure 5.15 Contraintes réelles Vs prédite pour le 2024-T4 en usinage MQL

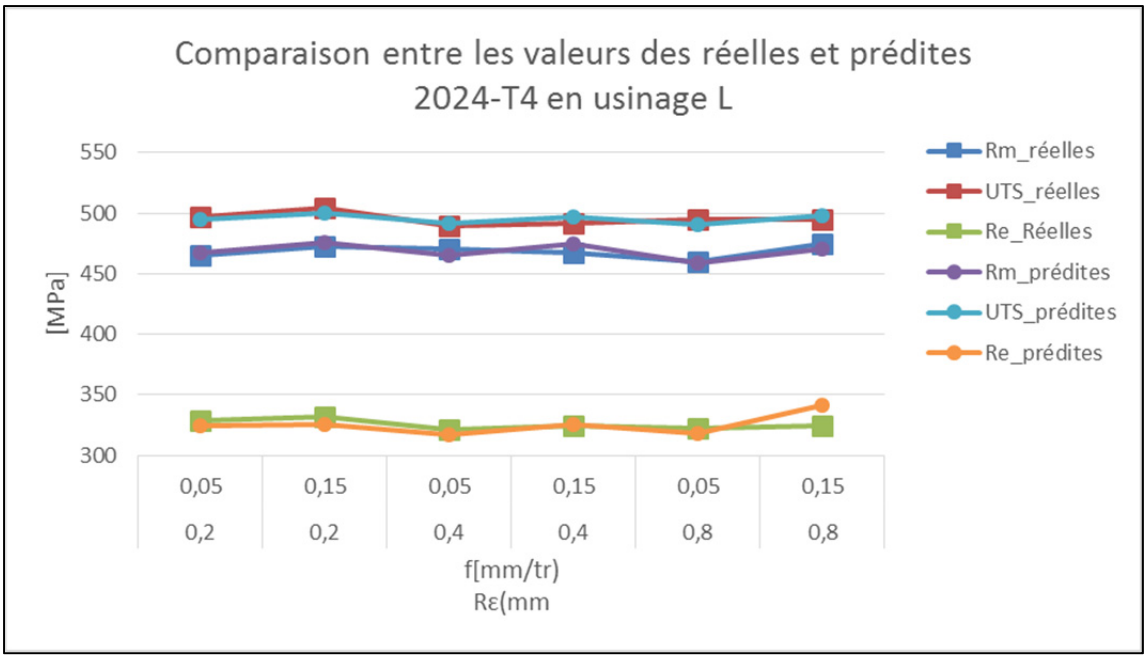


Figure 5.16 Contraintes réelles Vs prédites en usinage à lubrification abondante

Les figures illustrant les comportements de limites élastiques, les résistances à la traction et les contraintes ultimes entre les valeurs prédites et réelles pour les matériaux 6061-T6 et 7075-T651 pour les différents modes de lubrification S, MQL et L sont présentées dans l'annexe XVII.

5.4 Surfaces de réponses

Les surfaces de réponses nous permettant de visualiser la localisation de l'ensemble des réponses en fonction de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil pour chaque matériau (2024-T4, 6061-T6 et 7075-T651) et chaque mode de lubrification (S, MQL et L) sont représentées dans la figure 5.17. Ces surfaces de réponses sont obtenues suite à une interpolation à l'aide des modèles mathématiques de prédiction proposées comme on ne connait que quelques réponses qui correspondent aux points expérimentaux retenus lors de l'étude. Le choix de l'avance et du rayon du bec de l'outil dépendra alors de la valeur de la contrainte désirée.

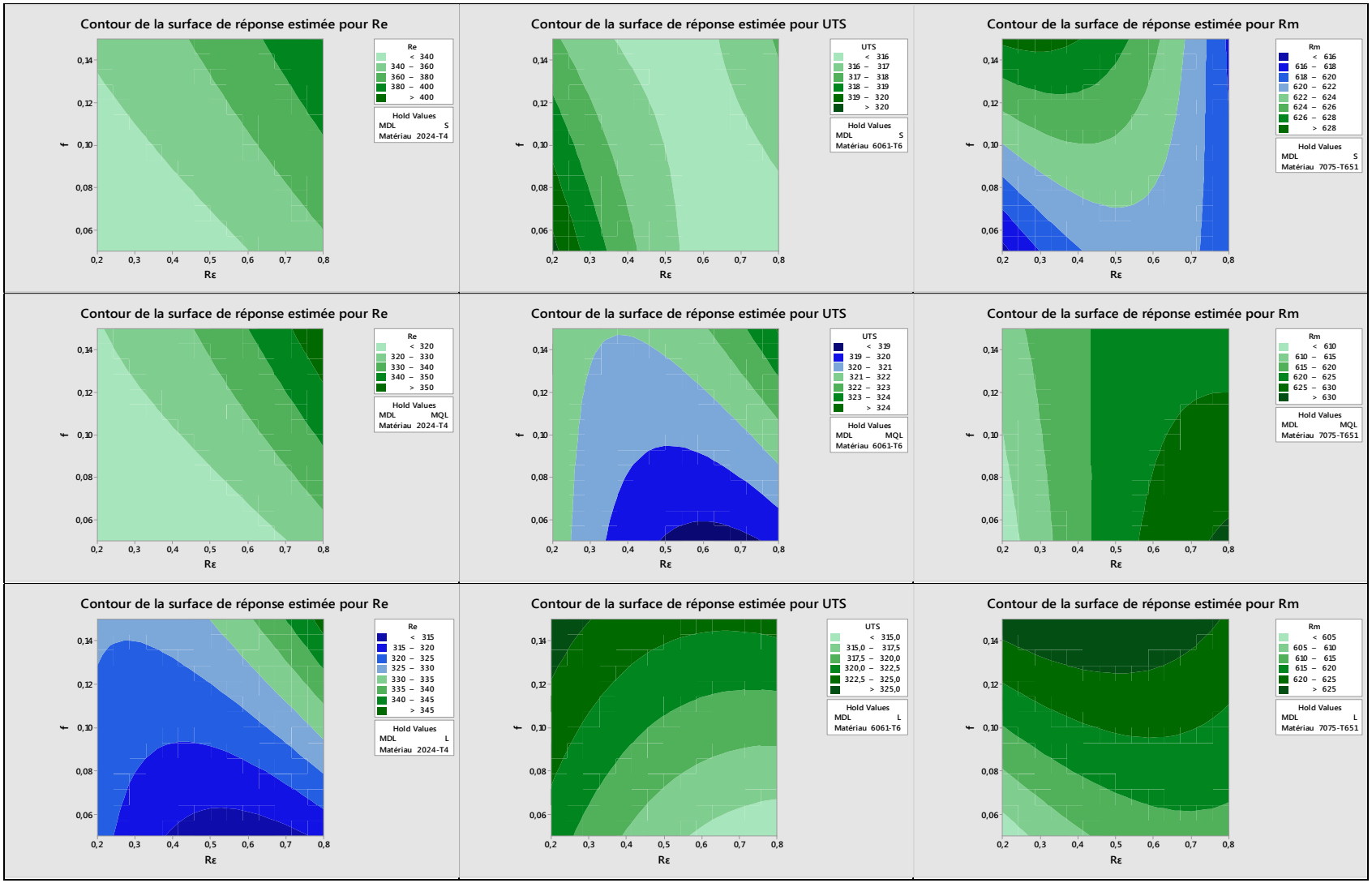


Figure 5.17 Contours des surfaces de réponses estimées pour les limites élastiques, contraintes ultimes et contraintes à la rupture

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les effets des conditions de coupe et des modes de lubrification sur le comportement en traction à partir d'une étude des contraintes ultimes, élastiques et celles de rupture. Il a été constaté que le 7075-T651 se comporte différemment du 2024-T4 et du 6061-T6 et présente les meilleures valeurs des contraintes. Ceci peut être expliqué par les propriétés mécaniques des matériaux et par l'état des surfaces usinées de point de vue rugosité de surface et contraintes résiduelles. Une modélisation du comportement de chaque contrainte décrivant le comportement des trois matériaux étudiés a été suggérée se basant sur les résultats expérimentaux et en suivant la méthodologie des plans d'expériences.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'influence des conditions de coupe sur la rugosité de surface, les contraintes résiduelles et le comportement en traction pour des pièces usinées à sec, sous quantité minimale de lubrification et sous lubrification abondante, en alliages d'Aluminium AA2024-T4, AA6061-T6 et AA7075-T651. Les paramètres de coupe étudiés étaient la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil de coupe.

Pour ce faire, la méthodologie des plans d'expériences a été utilisée.

Les résultats obtenus montrent que seuls la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil ont une influence significative sur les paramètres de rugosité retenus pour cette étude. Ces paramètres, décrivant l'état géométrique de la surface, augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la diminution du rayon de l'outil, et ce dans le domaine de variation des facteurs choisi. Il a été constaté aussi que la nature du matériau et les modes de lubrification n'ont pas de contribution significative sur le comportement de la rugosité. Cependant, une légère influence est observée pour les surfaces des pièces usinées sous quantité minimale de lubrification qui ont présenté de meilleurs états de surface. De plus, le 7075-T651 a présenté des valeurs de rugosité plus élevées que les autres matériaux.

Pour ce qui est des contraintes résiduelles, des contraintes à tendances compressives et des contraintes de traction ont été perçues en surface. La lubrification minimale MQL a présenté les plus faibles valeurs des contraintes dont le comportement était proportionnel à la vitesse d'avance. Cependant, pour le rayon de l'outil, deux comportements ont été constatés. En partant du rayon le plus faible jusqu'au rayon de valeur « moyenne » du domaine de l'étude, les contraintes diminuent. Au-delà de cette valeur du rayon, les contraintes augmentent pour les valeurs les plus élevées des rayons.

Rapport-Gratuit.com

Pour la rugosité arithmétique de surface et les contraintes résiduelles, des modélisations ont été proposées et une optimisation pour quelques réponses a été suggérée en optant pour des fonctions de désirabilité.

Aussi, les éprouvettes usinées ont été soumises à des tests de tractions monotones desquels les comportements des contraintes ultimes, élastiques et de rupture ont été étudiés. Il s'est avéré que le matériau était le plus significatif des facteurs suite à une analyse globale des effets et interactions des contraintes. Le 7075-T651 a présenté les meilleures performances avec des valeurs de contraintes les plus élevées, suivi du 2024-T4 et ensuite du 6061-T6. La minimale quantité de lubrification s'est distinguée par le meilleur comportement des éprouvettes soumises à la traction.

Il sera intéressant d'étendre le domaine de variations des facteurs au-delà du domaine choisi pour cette étude afin de déterminer si les modèles et optimisations proposés reflètent une tendance générale ou expriment un cas isolé limité par le domaine d'étude choisi dans ce travail.

RECOMMANDATIONS

Les recommandations qui peuvent être faites pour les travaux à venir dans le même contexte que ce travail de recherche sont :

- Effectuer des tests de validation des modèles de prédictions proposés, et ce avec les valeurs optimales proposées de la vitesse d'avance et du rayon du bec de l'outil;

- Tester les résultats dans un domaine de variation des facteurs différents pour des plus grandes avances entre autres et avec différents revêtements d'outils de coupe;

- Faire une étude de la microstructure.et des phénomènes thermiques et mécaniques dans la zone de coupe, et leurs effets sur les contraintes résiduelles;

- Tester les résultats avec une variation dans l'usinage à lubrification minimale, étant donné qu'il s'agit du mode de lubrification qui a donné pratiquement les meilleures réponses;

- Avec les profils de rugosités collectés, régénérer les surfaces des éprouvettes usinées sous certaines hypothèses avec un logiciel de conception mécanique, solliciter les surfaces générées à différents efforts mécaniques et aboutir à des modèles numériques à comparer avec ceux obtenus expérimentalement par une étude statistique;

- Investiguer l'usure de l'outil suite aux variations des modes de lubrification, de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe;

- Utiliser d'autres stratégies d'optimisation multi objectives des réponses comme, par exemple, les algorithmes génétiques.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE I

MATRICE DES RÉPONSES POUR LA RUGOSITÉ DE SURFACE

Essai	Matériau	Lubrification	Rε	f	Ra	Rq	Rv	Rc	Rsm	Rk
1	6061-T6	S	0,2	0,05	0,458	0,564	1,224	1,501	0,078	1,472
2	6061-T6	S	0,2	0,1	1,357	1,632	2,725	5,071	0,101	3,677
3	6061-T6	S	0,2	0,15	3,389	3,951	5,249	12,496	0,151	6,4
4	6061-T6	S	0,4	0,05	0,642	0,803	1,657	2,481	0,181	1,484
5	6061-T6	S	0,4	0,1	0,517	0,646	1,709	1,889	0,117	1,541
6	6061-T6	S	0,4	0,15	1,455	1,768	2,162	5,925	0,152	2,442
7	6061-T6	S	0,8	0,05	0,202	0,252	0,785	0,84	0,066	0,637
8	6061-T6	S	0,8	0,1	0,34	0,423	1,035	1,389	0,106	1,066
9	6061-T6	S	0,8	0,15	0,864	0,983	1,508	3,068	0,152	2,024
10	6061-T6	MQL	0,2	0,05	0,362	0,441	0,937	1,087	0,084	1,208
11	6061-T6	MQL	0,2	0,1	1,438	1,663	2,1	5,058	0,101	2,549
12	6061-T6	MQL	0,2	0,15	3,304	3,797	4,792	11,784	0,153	6,06
13	6061-T6	MQL	0,4	0,05	0,305	0,374	1	1,056	0,078	0,974
14	6061-T6	MQL	0,4	0,1	0,671	0,786	1,519	2,635	0,104	2,091
15	6061-T6	MQL	0,4	0,15	1,587	1,891	2,861	6,474	0,152	3,92
16	6061-T6	MQL	0,8	0,05	0,274	0,342	0,942	0,977	0,066	0,895
17	6061-T6	MQL	0,8	0,1	0,373	0,466	1,225	1,511	0,085	1,224
18	6061-T6	MQL	0,8	0,15	0,746	0,913	1,375	3,222	0,161	1,353
19	6061-T6	L	0,2	0,05	0,391	0,47	1,167	1,254	0,063	1,386
20	6061-T6	L	0,2	0,1	1,374	1,638	2,703	5,162	0,102	3,395
21	6061-T6	L	0,2	0,15	3,209	3,683	4,884	11,195	0,151	6,07
22	6061-T6	L	0,4	0,05	0,384	0,465	0,955	1,471	0,293	1,163
23	6061-T6	L	0,4	0,1	0,413	0,502	1,094	1,485	0,112	1,382
24	6061-T6	L	0,4	0,15	1,443	1,756	2,25	5,887	0,162	2,719
25	6061-T6	L	0,8	0,05	0,201	0,249	0,609	0,681	0,082	0,666
26	6061-T6	L	0,8	0,1	0,361	0,436	0,902	1,255	0,115	1,292
27	6061-T6	L	0,8	0,15	0,813	0,936	1,588	2,795	0,151	2,274
28	7075-T651	S	0,2	0,05	0,52	0,634	1,54	1,654	0,064	1,801
29	7075-T651	S	0,2	0,1	1,344	1,566	2,602	5,035	0,101	4,005
30	7075-T651	S	0,2	0,15	3,099	3,645	5,333	11,786	0,151	7,36
31	7075-T651	S	0,4	0,05	0,314	0,39	1,101	0,959	0,115	0,986
32	7075-T651	S	0,4	0,1	0,549	0,658	1,304	2,138	0,1	1,758
33	7075-T651	S	0,4	0,15	1,582	1,885	2,908	6,383	0,153	3,342

Essai	Matériau	Lubrification	Rε	f	Ra	Rq	Rv	Rc	Rsm	Rk
34	7075-T651	S	0,8	0,05	0,262	0,326	0,802	0,78	0,094	0,82
35	7075-T651	S	0,8	0,1	0,323	0,396	0,875	1,301	0,146	1,049
36	7075-T651	S	0,8	0,15	0,82	0,972	1,616	2,949	0,159	2,051
37	7075-T651	MQL	0,2	0,05	0,333	0,408	0,817	1,047	0,062	1,092
38	7075-T651	MQL	0,2	0,1	1,41	1,639	2,415	5,028	0,101	2,751
39	7075-T651	MQL	0,2	0,15	3,323	3,828	5	11,983	0,151	5,79
40	7075-T651	MQL	0,4	0,05	0,323	0,399	1,102	1,182	0,095	1,004
41	7075-T651	MQL	0,4	0,1	0,686	0,8	1,579	2,519	0,101	2,216
42	7075-T651	MQL	0,4	0,15	1,533	1,82	2,768	6,152	0,152	3,84
43	7075-T651	MQL	0,8	0,05	0,413	0,508	1,512	1,616	0,065	0,89
44	7075-T651	MQL	0,8	0,1	0,37	0,46	1,22	1,5	0,08	1,221
45	7075-T651	MQL	0,8	0,15	0,783	0,955	1,505	3,201	0,177	2,056
46	7075-T651	L	0,2	0,05	0,47	0,551	1,467	1,608	0,054	1,637
47	7075-T651	L	0,2	0,1	1,349	1,574	2,637	5,159	0,102	3,797
48	7075-T651	L	0,2	0,15	2,837	3,274	4,854	9,901	0,153	7,236
49	7075-T651	L	0,4	0,05	0,377	0,453	0,891	0,919	0,077	1,207
50	7075-T651	L	0,4	0,1	0,634	0,765	1,454	2,419	0,101	2,098
51	7075-T651	L	0,4	0,15	1,709	2,055	4,622	7,106	0,207	4,803
52	7075-T651	L	0,8	0,05	0,335	0,41	0,984	1,035	0,078	1,139
53	7075-T651	L	0,8	0,1	0,362	0,45	0,942	1,336	0,113	1,107
54	7075-T651	L	0,8	0,15	0,831	0,953	1,488	3,05	0,154	1,96
55	2024-T4	S	0,2	0,05	0,275	0,326	0,787	1,069	0,048	1,036
56	2024-T4	S	0,2	0,1	1,3	1,468	2,418	4,43	0,102	2,926
57	2024-T4	S	0,2	0,15	2,875	3,316	4,26	10,153	0,152	1,9
58	2024-T4	S	0,4	0,05	0,273	0,344	1,021	1,071	0,065	0,831
59	2024-T4	S	0,4	0,1	0,584	0,709	0,99	2,324	0,101	0,987
60	2024-T4	S	0,4	0,15	1,714	1,948	3,176	6,201	0,153	1,955
61	2024-T4	S	0,8	0,05	0,133	0,161	0,425	0,429	0,038	0,48
62	2024-T4	S	0,8	0,1	0,335	0,395	0,654	1,285	0,101	0,982
63	2024-T4	S	0,8	0,15	0,818	0,991	1,742	3,649	0,152	2,509
64	2024-T4	MQL	0,2	0,05	0,473	0,559	0,839	1,741	0,05	1,011
65	2024-T4	MQL	0,2	0,1	1,315	1,47	2,255	4,236	0,102	0,712
66	2024-T4	MQL	0,2	0,15	2,818	3,297	4,686	10,811	0,152	0,501
67	2024-T4	MQL	0,4	0,05	0,13	0,159	0,375	0,474	0,046	0,436
68	2024-T4	MQL	0,4	0,1	0,526	0,609	0,813	2,019	0,101	0,936
69	2024-T4	MQL	0,4	0,15	1,188	1,324	2,043	3,971	0,153	2,781
70	2024-T4	MQL	0,8	0,05	0,201	0,248	0,695	0,819	0,054	0,689
71	2024-T4	MQL	0,8	0,1	0,219	0,273	0,735	0,797	0,069	0,622
72	2024-T4	MQL	0,8	0,15	0,609	0,734	1,115	2,261	0,128	1,978

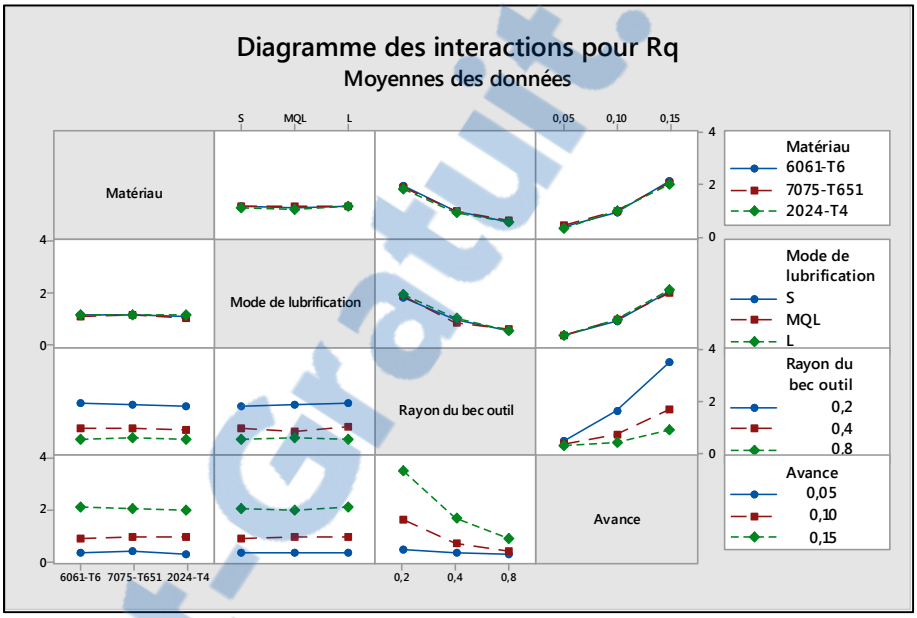
Essai	Matériau	Lubrification	Rε	f	Ra	Rq	Rv	Rc	Rsm	Rk
73	2024-T4	L	0,2	0,05	0,415	0,498	1,151	1,717	0,048	1,184
74	2024-T4	L	0,2	0,1	1,437	1,611	2,782	5,378	0,102	3,885
75	2024-T4	L	0,2	0,15	3,028	3,487	4,769	11,199	0,152	1,326
76	2024-T4	L	0,4	0,05	0,135	0,17	0,727	0,576	0,055	0,401
77	2024-T4	L	0,4	0,1	0,871	0,991	1,595	3,09	0,102	2,504
78	2024-T4	L	0,4	0,15	1,52	1,782	2,72	6,125	0,152	4,572
79	2024-T4	L	0,8	0,05	0,143	0,18	0,744	0,652	0,048	0,471
80	2024-T4	L	0,8	0,1	0,229	0,277	0,568	0,817	0,071	0,534
81	2024-T4	L	0,8	0,15	0,769	0,883	1,312	2,676	0,151	1,805
82	6061-T6	S	0,2	0,05	0,325	0,397	1,293	1,286	0,043	1,122
83	6061-T6	S	0,2	0,1	1,354	1,534	1,984	4,504	0,102	2,7
84	6061-T6	S	0,2	0,15	2,963	3,407	4,248	10,492	0,152	1,886
85	6061-T6	S	0,4	0,05	0,135	0,161	0,495	0,515	0,054	0,461
86	6061-T6	S	0,4	0,1	0,63	0,786	1,35	2,905	0,122	1,415
87	6061-T6	S	0,4	0,15	1,696	1,908	2,437	5,671	0,152	2,377
88	6061-T6	S	0,8	0,05	0,115	0,142	0,327	0,426	0,048	0,396
89	6061-T6	S	0,8	0,1	0,317	0,373	1,08	1,188	0,115	1,086
90	6061-T6	S	0,8	0,15	0,843	1,019	2,146	3,838	0,15	2,13
91	6061-T6	MQL	0,2	0,05	0,5	0,57	1,358	1,769	0,051	1,302
92	6061-T6	MQL	0,2	0,1	1,401	1,561	2,411	4,446	0,102	0,6
93	6061-T6	MQL	0,2	0,15	2,953	3,456	4,917	10,967	0,152	0,4
94	6061-T6	MQL	0,4	0,05	0,116	0,144	0,382	0,473	0,04	0,383
95	6061-T6	MQL	0,4	0,1	0,534	0,616	1,102	1,976	0,089	1,471
96	6061-T6	MQL	0,4	0,15	1,357	1,539	2,16	5,051	0,154	2,7
97	6061-T6	MQL	0,8	0,05	0,211	0,272	0,816	0,948	0,093	0,625
98	6061-T6	MQL	0,8	0,1	0,234	0,29	0,762	0,958	0,093	0,737
99	6061-T6	MQL	0,8	0,15	0,679	0,779	0,935	2,487	0,151	1,14
100	6061-T6	L	0,2	0,05	0,39	0,456	1,15	1,665	0,051	0,847
101	6061-T6	L	0,2	0,1	1,511	1,677	2,565	4,93	0,102	3,329
102	6061-T6	L	0,2	0,15	3,094	3,548	4,962	10,856	0,151	1,32
103	6061-T6	L	0,4	0,05	0,353	0,407	0,786	1,201	0,051	1,265
104	6061-T6	L	0,4	0,1	0,752	0,883	1,744	2,989	0,101	2,664
105	6061-T6	L	0,4	0,15	1,565	1,819	2,907	6,122	0,152	4,434
106	6061-T6	L	0,8	0,05	0,188	0,239	1,124	0,922	0,047	0,584
107	6061-T6	L	0,8	0,1	0,241	0,303	0,513	0,835	0,083	0,744
108	6061-T6	L	0,8	0,15	0,712	0,825	1,302	2,876	0,153	1,688
109	7075-T651	S	0,2	0,05	0,287	0,368	1,494	1,207	0,083	0,827
110	7075-T651	S	0,2	0,1	1,135	1,32	2,212	3,988	0,101	2,438
111	7075-T651	S	0,2	0,15	2,795	3,269	4,071	10,182	0,152	4,671

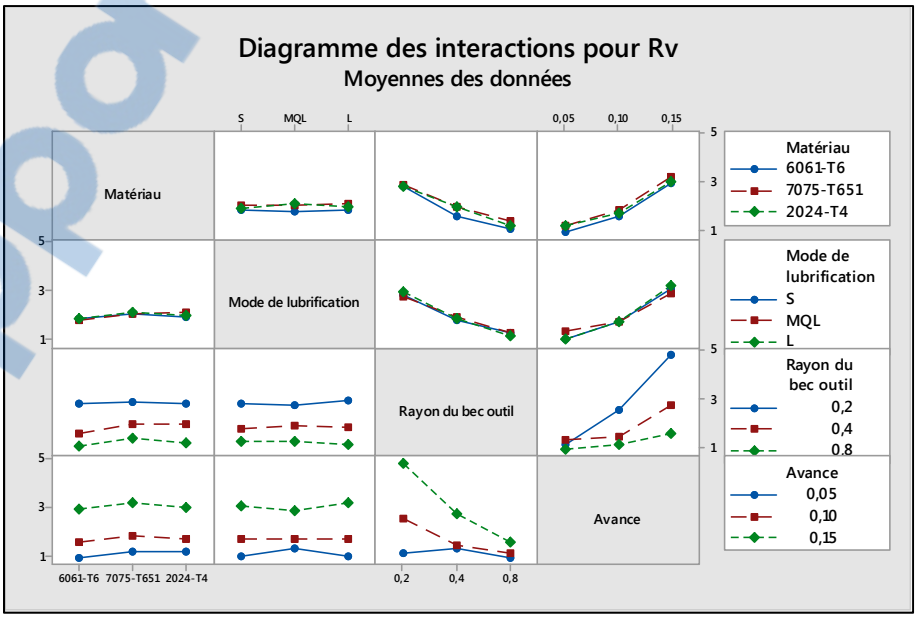
Essai	Matériau	Lubrification	Rε	f	Ra	Rq	Rv	Rc	Rsm	Rk
112	7075-T651	S	0,4	0,05	0,325	0,396	1,106	1,139	0,064	1,138
113	7075-T651	S	0,4	0,1	0,717	0,853	1,785	2,553	0,102	2,459
114	7075-T651	S	0,4	0,15	1,329	1,58	2,917	5,921	0,155	3,99
115	7075-T651	S	0,8	0,05	0,242	0,303	1,077	1,028	0,082	0,851
116	7075-T651	S	0,8	0,1	0,65	0,821	2,416	2,703	0,118	1,89
117	7075-T651	S	0,8	0,15	0,643	0,808	1,521	2,994	0,147	2,178
118	7075-T651	MQL	0,2	0,05	0,357	0,438	1,115	1,412	0,054	1,113
119	7075-T651	MQL	0,2	0,1	1,517	1,73	2,413	5,501	0,101	3,158
120	7075-T651	MQL	0,2	0,15	2,764	3,219	5,11	11,292	0,153	6,885
121	7075-T651	MQL	0,4	0,05	0,37	0,454	1,564	1,393	0,05	1,217
122	7075-T651	MQL	0,4	0,1	0,693	0,843	2,122	2,78	0,102	2,19
123	7075-T651	MQL	0,4	0,15	0,999	1,268	2,198	5,184	0,153	2,941
124	7075-T651	MQL	0,8	0,05	0,419	0,5	1,277	1,598	0,055	1,397
125	7075-T651	MQL	0,8	0,1	0,455	0,544	1,386	1,962	0,102	1,657
126	7075-T651	MQL	0,8	0,15	0,947	1,129	1,708	3,835	0,152	2,086
127	7075-T651	L	0,2	0,05	0,401	0,474	0,969	1,49	0,054	1,183
128	7075-T651	L	0,2	0,1	1,601	1,854	2,575	5,938	0,101	3,575
129	7075-T651	L	0,2	0,15	3,382	3,886	5,395	12,717	0,152	7,454
130	7075-T651	L	0,4	0,05	0,2	0,23	1,114	0,98	0,117	0,647
131	7075-T651	L	0,4	0,1	0,695	0,846	1,497	3,194	0,1	1,4
132	7075-T651	L	0,4	0,15	1,574	1,805	2,866	6,217	0,152	2,247
133	7075-T651	L	0,8	0,05	0,288	0,363	1,363	1,166	0,059	1,009
134	7075-T651	L	0,8	0,1	0,356	0,438	1,517	1,513	0,071	1,267
135	7075-T651	L	0,8	0,15	0,643	0,764	1,362	2,785	0,151	1,615
136	2024-T4	S	0,2	0,05	0,287	0,362	1,184	1,157	0,074	0,886
137	2024-T4	S	0,2	0,1	1,158	1,364	2,869	4,356	0,102	2,238
138	2024-T4	S	0,2	0,15	3,023	3,51	5,196	11,64	0,15	6,559
139	2024-T4	S	0,4	0,05	0,256	0,331	0,945	1,085	0,058	0,745
140	2024-T4	S	0,4	0,1	0,655	0,791	1,667	2,532	0,102	2,078
141	2024-T4	S	0,4	0,15	1,295	1,513	2,638	5,21	0,149	3,754
142	2024-T4	S	0,8	0,05	0,237	0,293	0,844	0,895	0,063	0,796
143	2024-T4	S	0,8	0,1	0,477	0,577	1,438	1,657	0,102	1,792
144	2024-T4	S	0,8	0,15	0,823	1,029	1,923	3,943	0,153	1,916
145	2024-T4	MQL	0,2	0,05	0,32	0,379	0,71	1,343	0,051	0,906
146	2024-T4	MQL	0,2	0,1	1,636	1,886	2,87	6,048	0,102	3,706
147	2024-T4	MQL	0,2	0,15	2,96	3,462	4,311	11,634	0,152	6,88
148	2024-T4	MQL	0,4	0,05	0,313	0,386	6,972	1,083	0,059	1,025
149	2024-T4	MQL	0,4	0,1	0,533	0,635	1,799	2,31	0,104	1,339
150	2024-T4	MQL	0,4	0,15	1,036	1,245	2,192	4,679	0,154	2,339

Essai	Matériau	Lubrification	Rε	f	Ra	Rq	Rv	Rc	Rsm	Rk
151	2024-T4	MQL	0,8	0,05	0,323	0,416	1,153	1,439	0,06	0,912
152	2024-T4	MQL	0,8	0,1	0,581	0,739	2,172	2,041	0,078	1,431
153	2024-T4	MQL	0,8	0,15	0,776	0,963	2,058	3,85	0,153	2,053
154	2024-T4	L	0,2	0,05	0,424	0,492	1,116	1,522	0,054	1,218
155	2024-T4	L	0,2	0,1	1,693	1,949	3,12	6,08	0,102	3,412
156	2024-T4	L	0,2	0,15	3,118	3,594	5,017	11,712	0,152	5,598
157	2024-T4	L	0,4	0,05	0,205	0,264	1,114	0,98	0,117	0,647
158	2024-T4	L	0,4	0,1	0,651	0,8	1,446	2,979	0,101	1,211
159	2024-T4	L	0,4	0,15	1,751	2,046	3,016	6,644	0,152	3,316
160	2024-T4	L	0,8	0,05	0,272	0,334	0,8	1,068	0,054	0,946
161	2024-T4	L	0,8	0,1	0,309	0,375	0,97	1,232	0,073	0,996
162	2024-T4	L	0,8	0,15	0,819	0,95	1,914	3,384	0,152	1,789

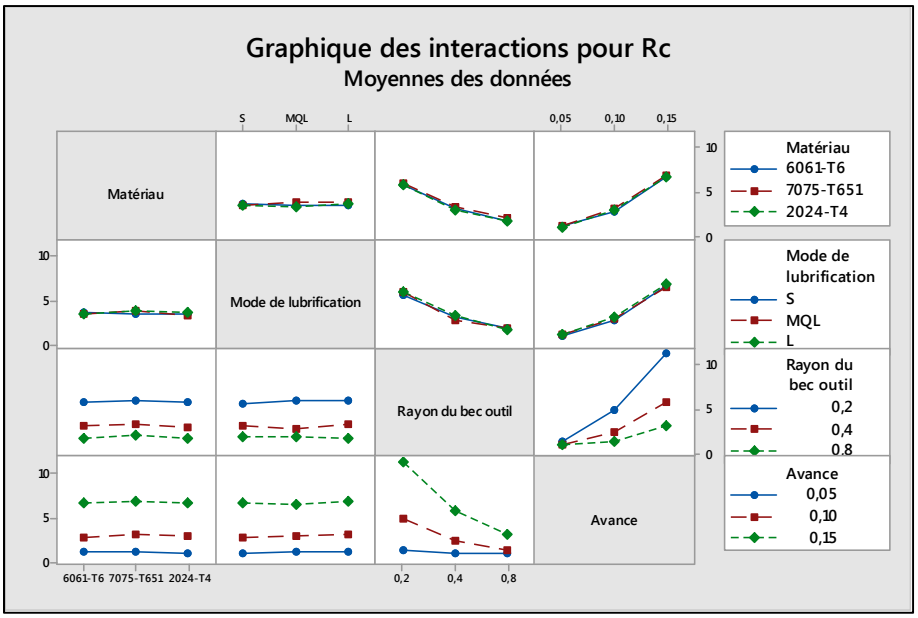
ANNEXE II

EFFETS DES INTERACTIONS SUR R_q, R_v, R_c, R_{sm} et R_k





Rapport-Gratuit.com


Graphique des interactions pour Rc
Moyennes des données
Matériau
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
S
MQL
L
0,05
0,10
0,15
6061-T6
7075-T651
2024-T4
0,2
0,4
0,8
10
5
0
Matériau
6061-T6
7075-T651
2024-T4
Mode de lubrification
S
MQL
L
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8
Avance
0,05
0,10
0,15

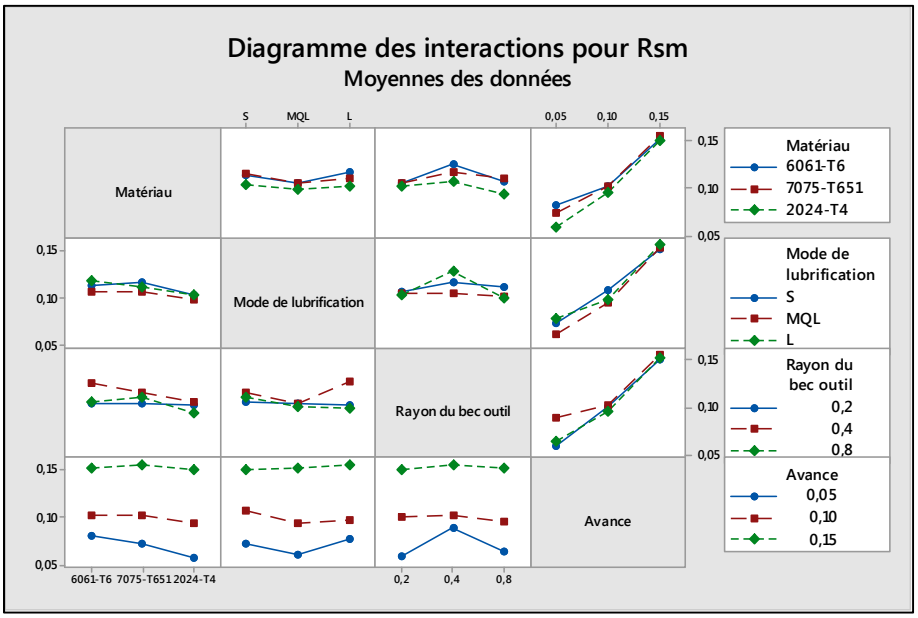
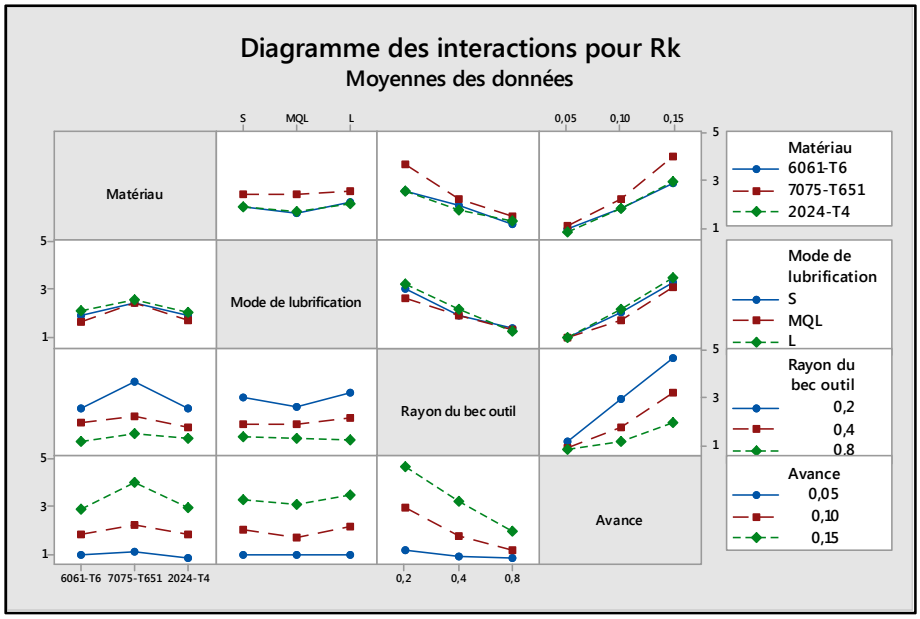


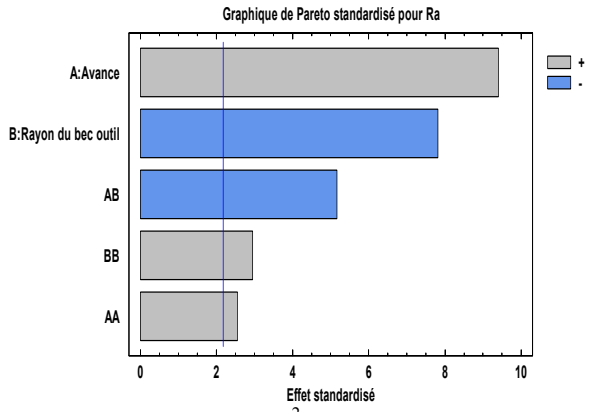
Diagramme des interactions pour Rsm
Moyennes des données
Matériau
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
S
MQL
L
0,05
0,10
0,15
6061-T6
7075-T651
2024-T4
0,2
0,4
0,8
Matériau
6061-T6
7075-T651
2024-T4
Mode de lubrification
S
MQL
L
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8
Avance
0,05
0,10
0,15



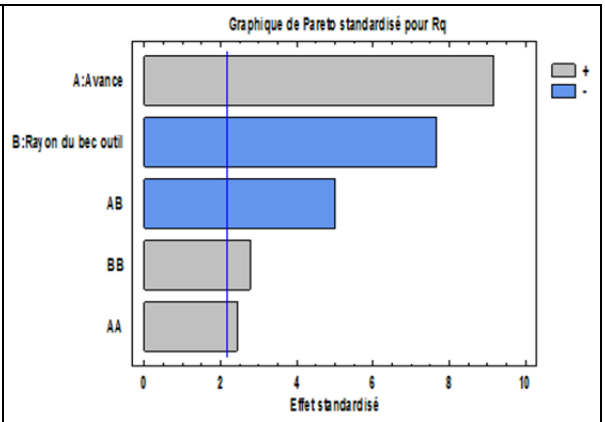
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE III

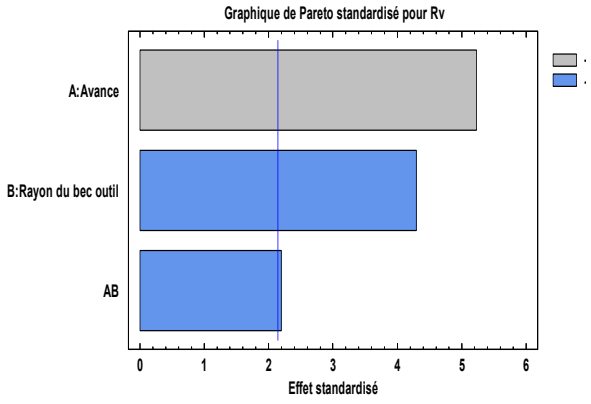
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À SEC DU 6061-T6



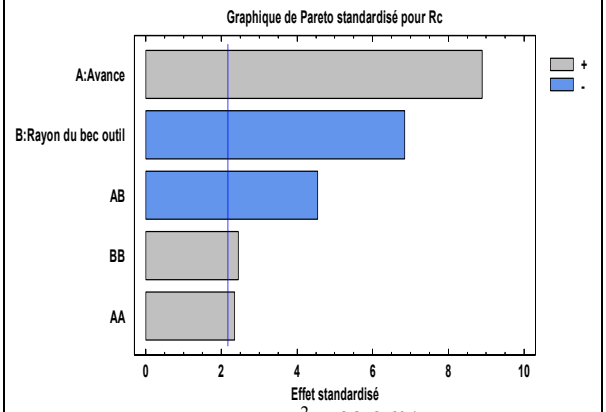
- $R^2 = 94{,}33\%$



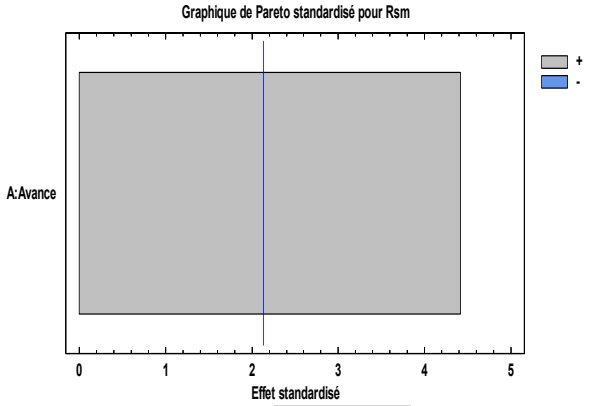
- $R^2 = 94{,}53\%$



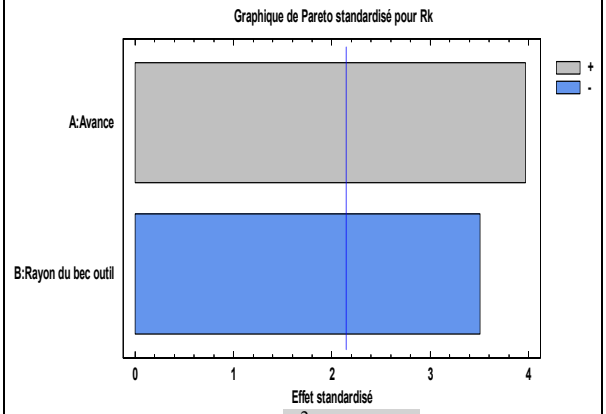
- $R^2 = 81{,}01\%$



- $R^2 = 93{,}26\%$

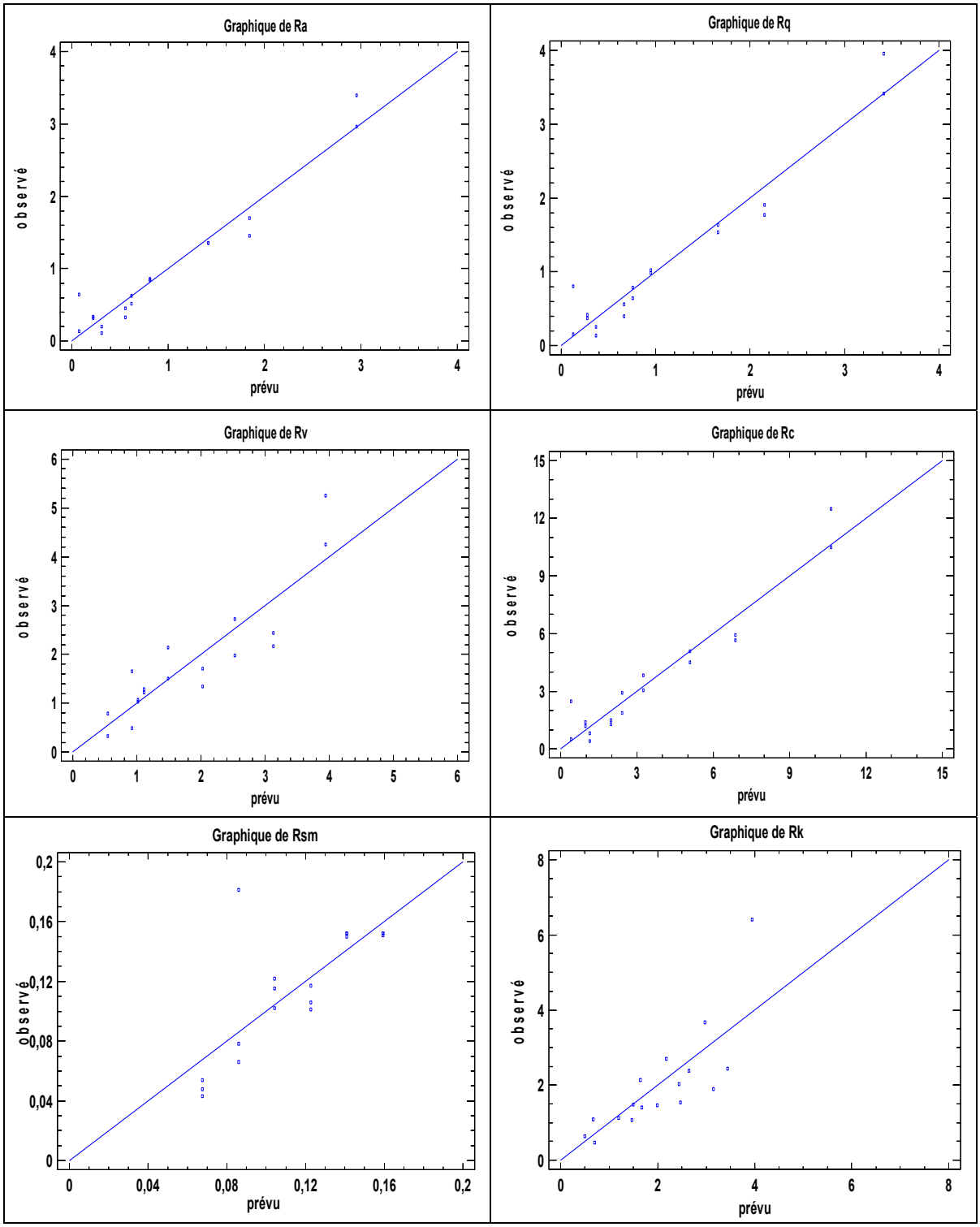


- $R^2 = 58{,}69\%$

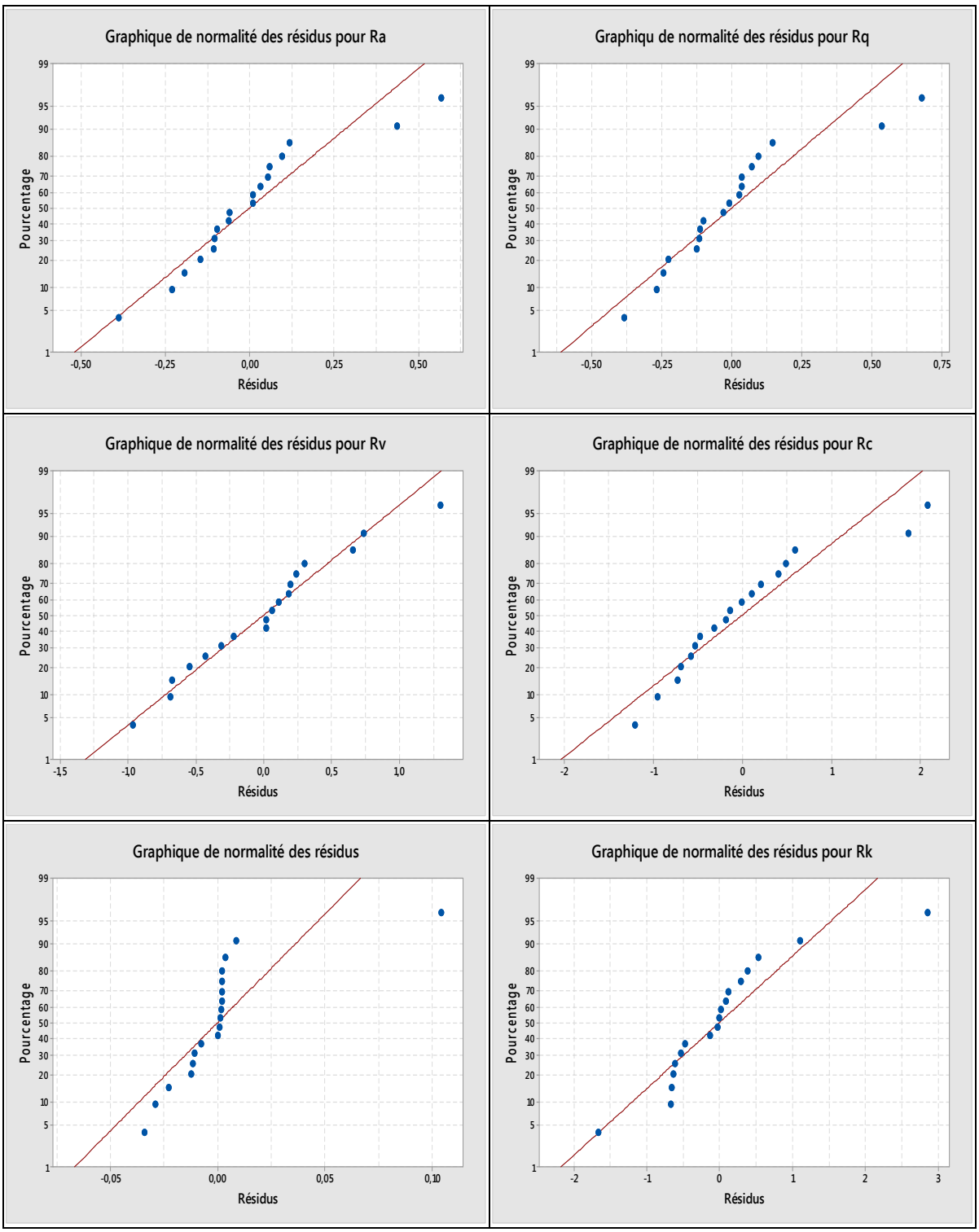


- $R^2 = 63{,}93\%$

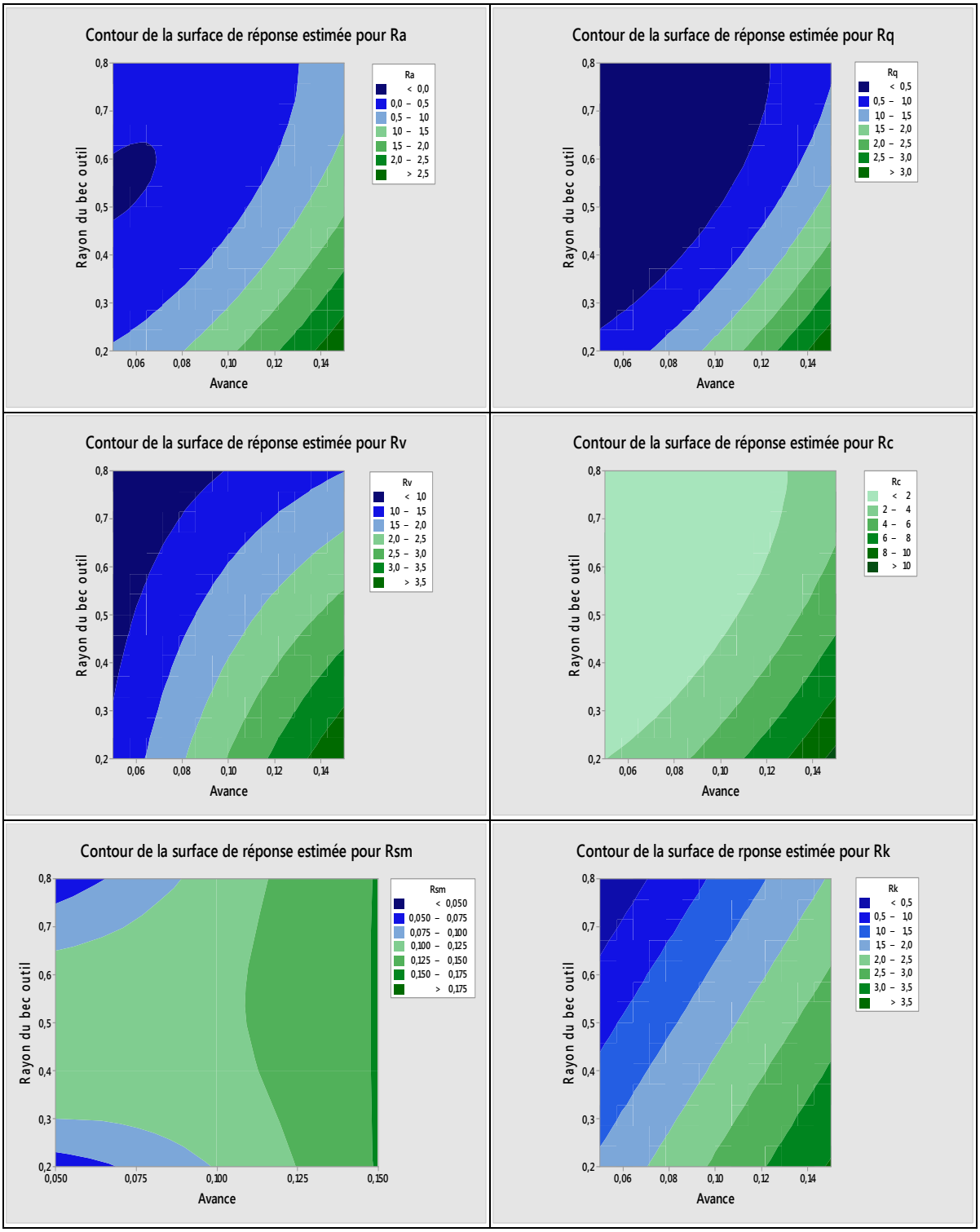
- Observés Vs prédits



- Graphiques de normalité des résidus

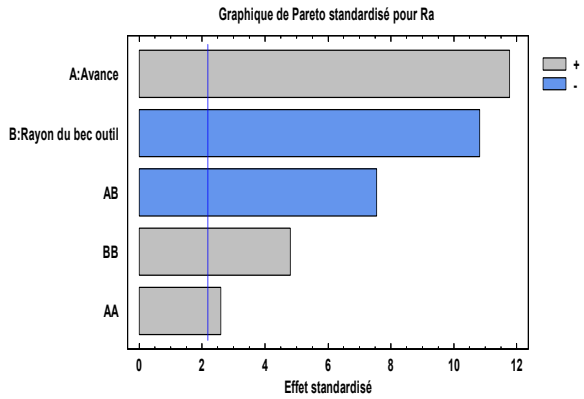


- Graphiques des surfaces de réponses

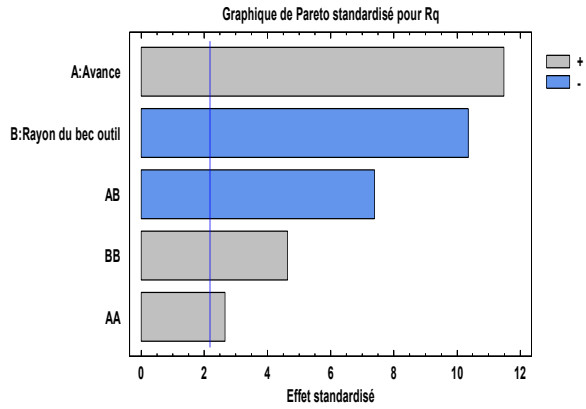


ANNEXE IV

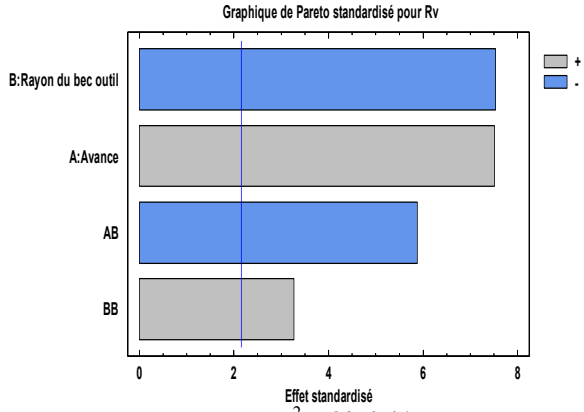
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ DE LUBRIFICATION MINIMALE DU 6061-T6



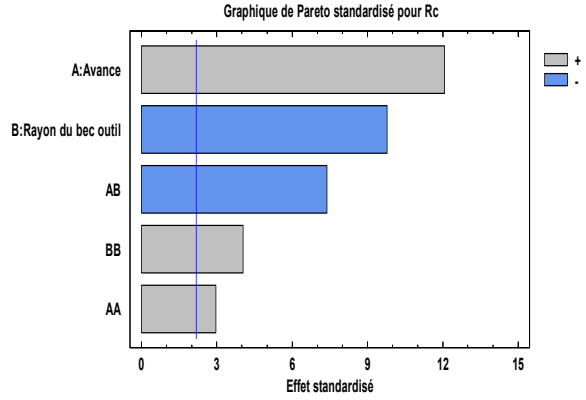
- $R^2 = 96,72\%$



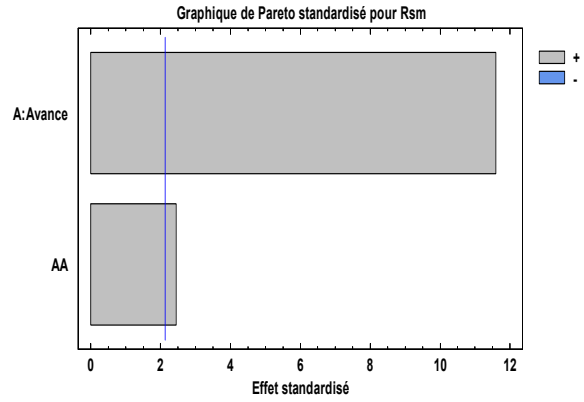
- $R^2 = 96,53\%$



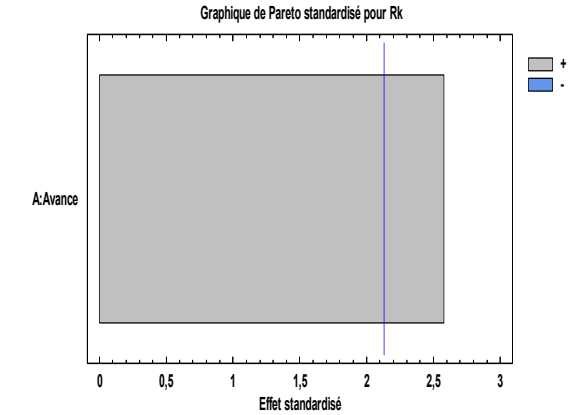
- $R^2 = 92,67\%$



- $R^2 = 96,56\%$

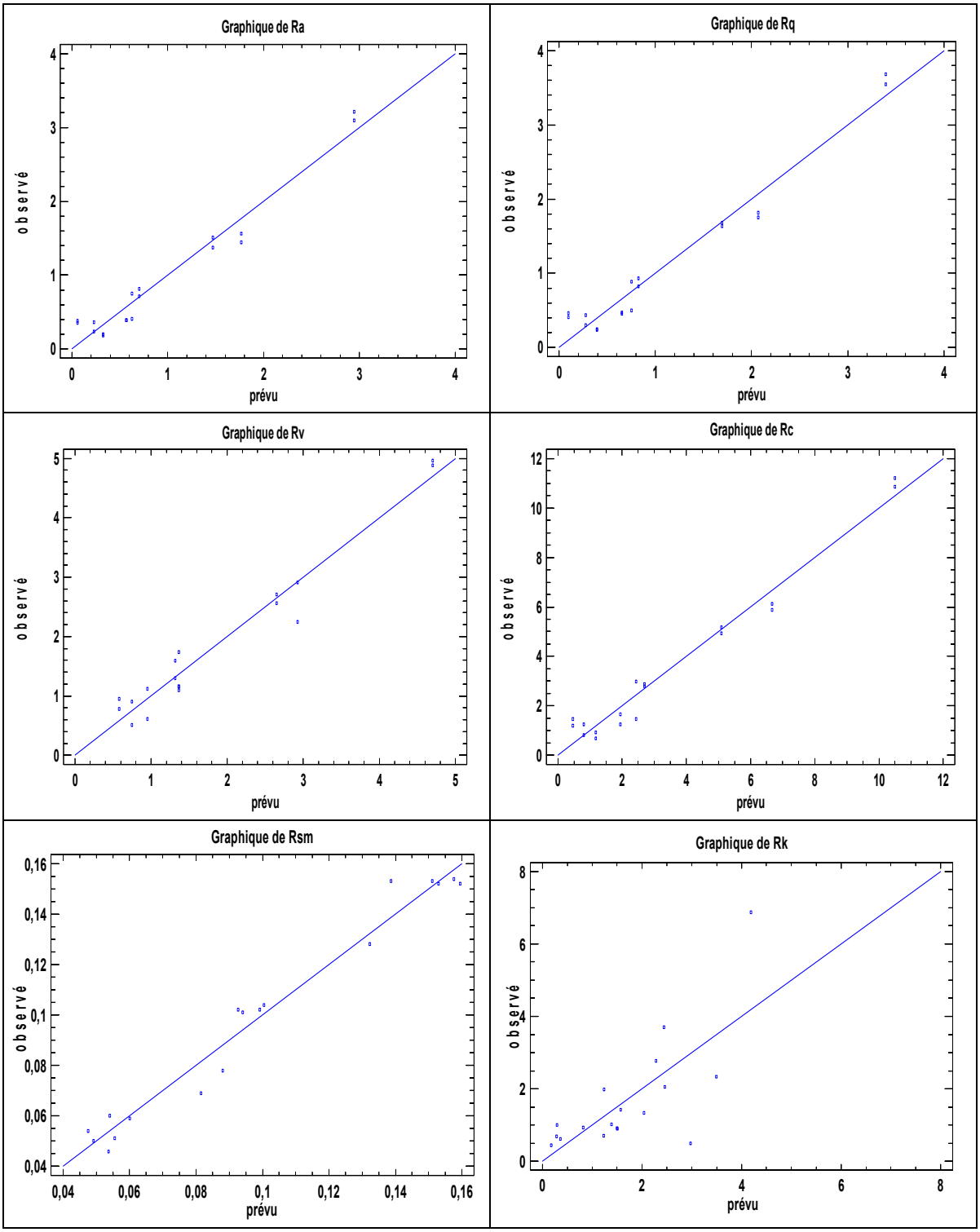


- $R^2 = 90,35\%$

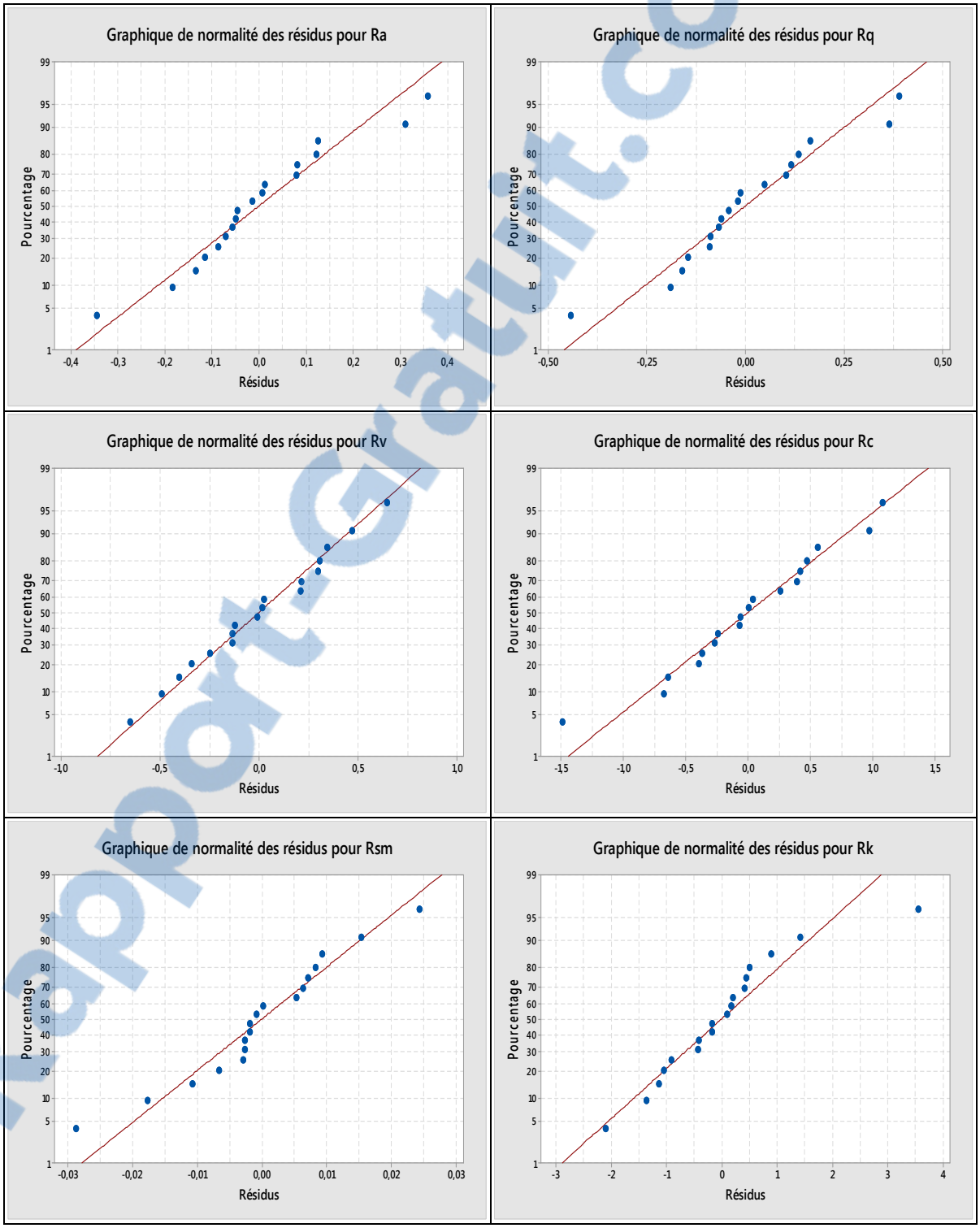


- $R^2 = 56\%$

- Observés Vs prédits

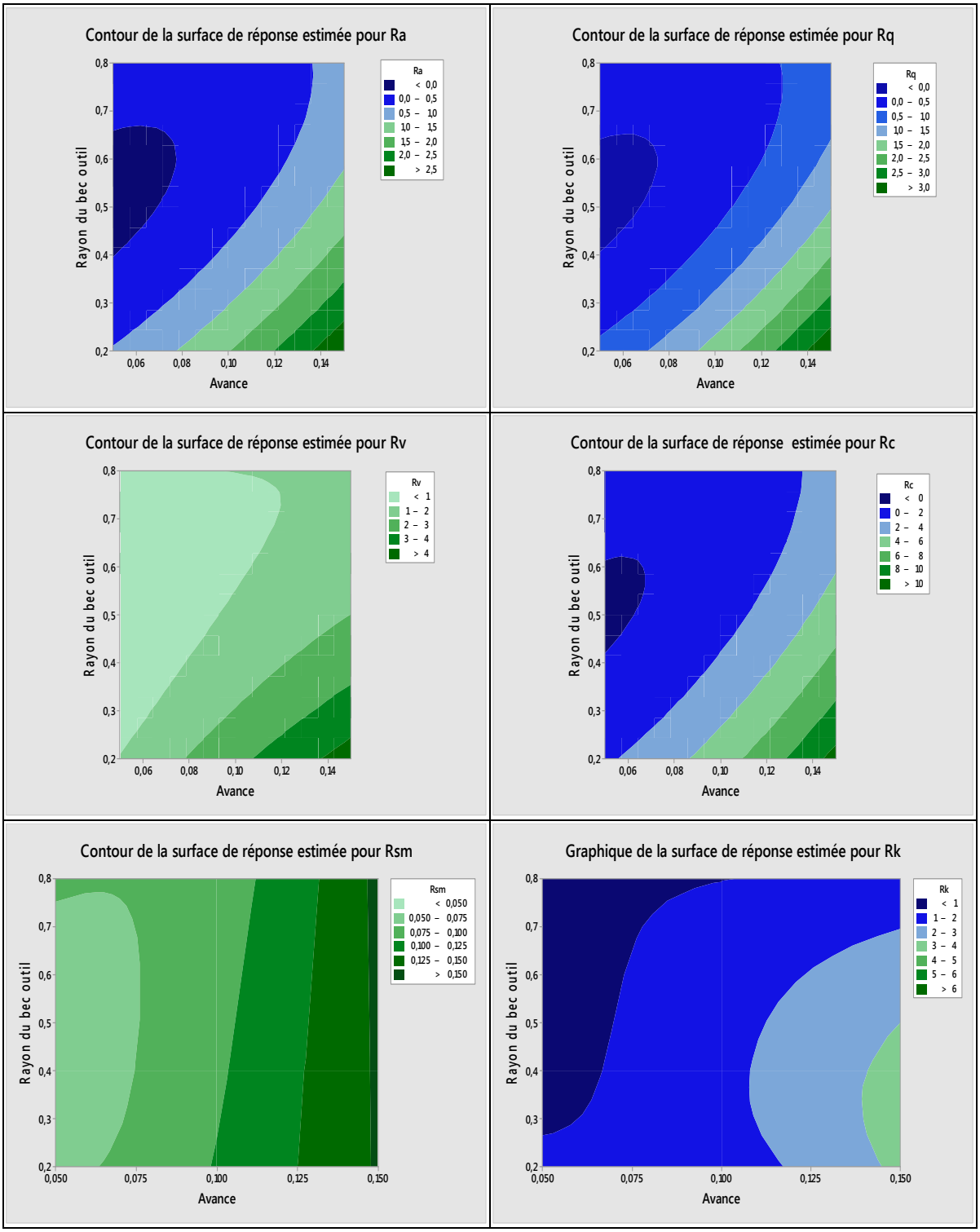


- Graphiques de normalité des résidus



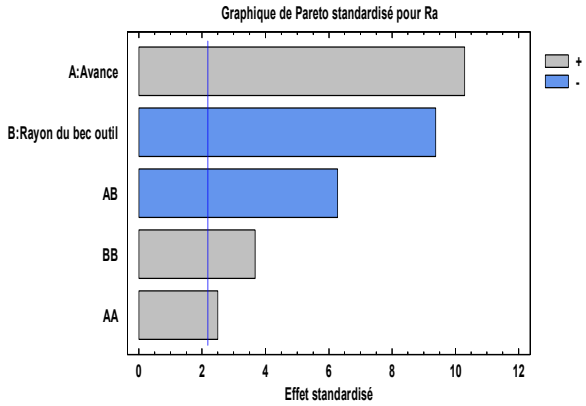
Rapport-Gratuit.com

- Graphiques des surfaces de réponses

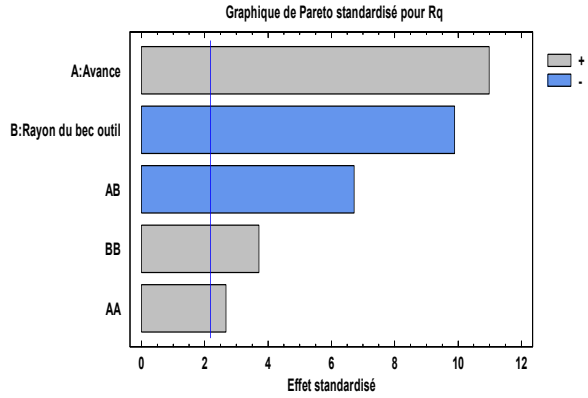


ANNEXE V

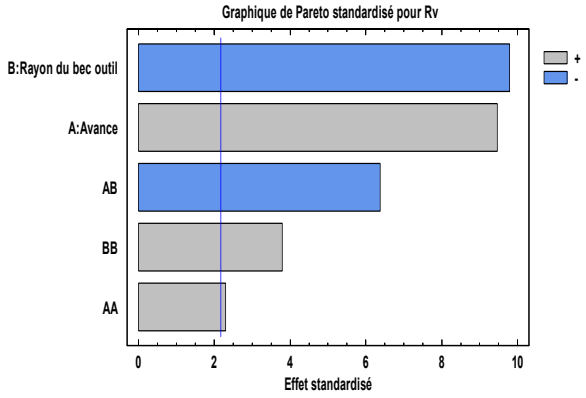
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 6061-T6



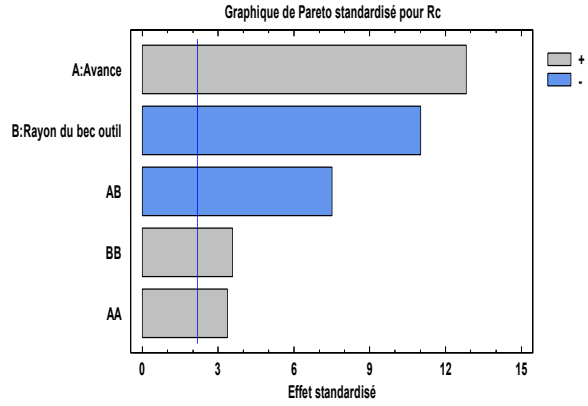
$R^2 = 96,12\%$



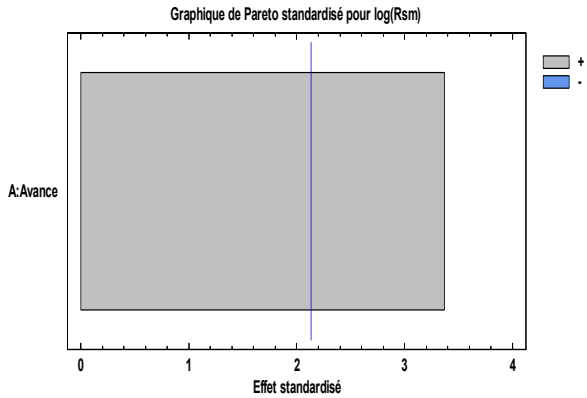
- $R^2 = 95,49\%$



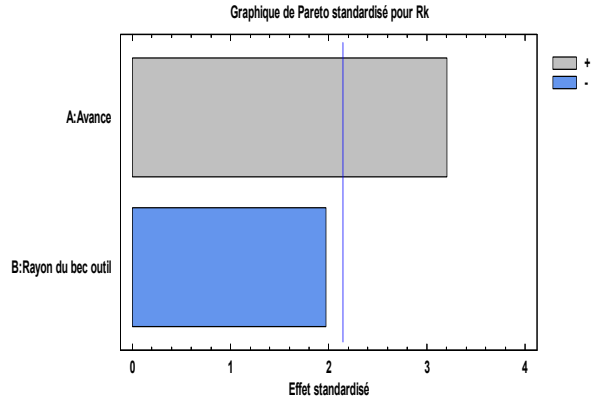
- $R^2 = 95,48\%$



- $R^2 = 96,98\%$



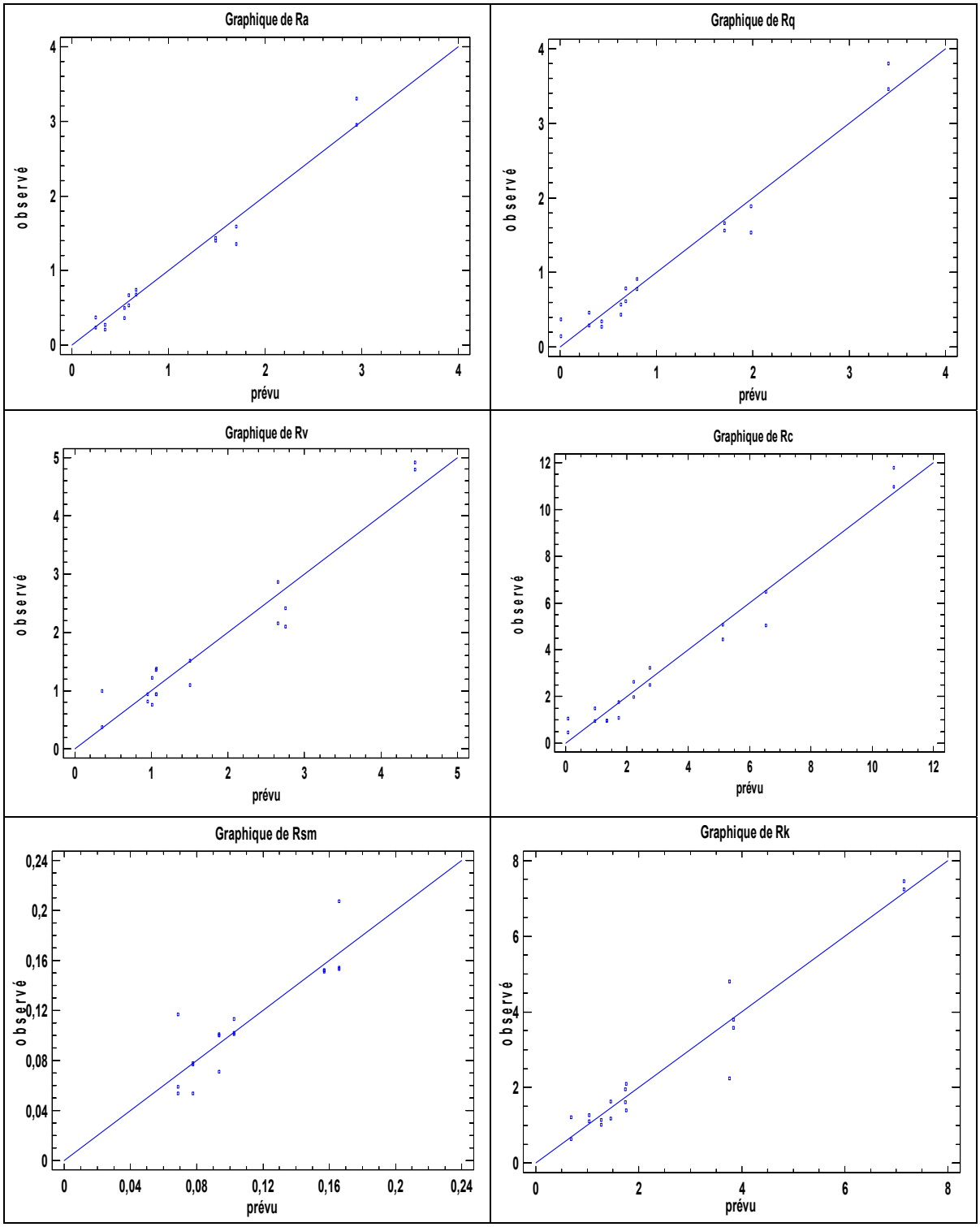
- $R^2 = 38\%$



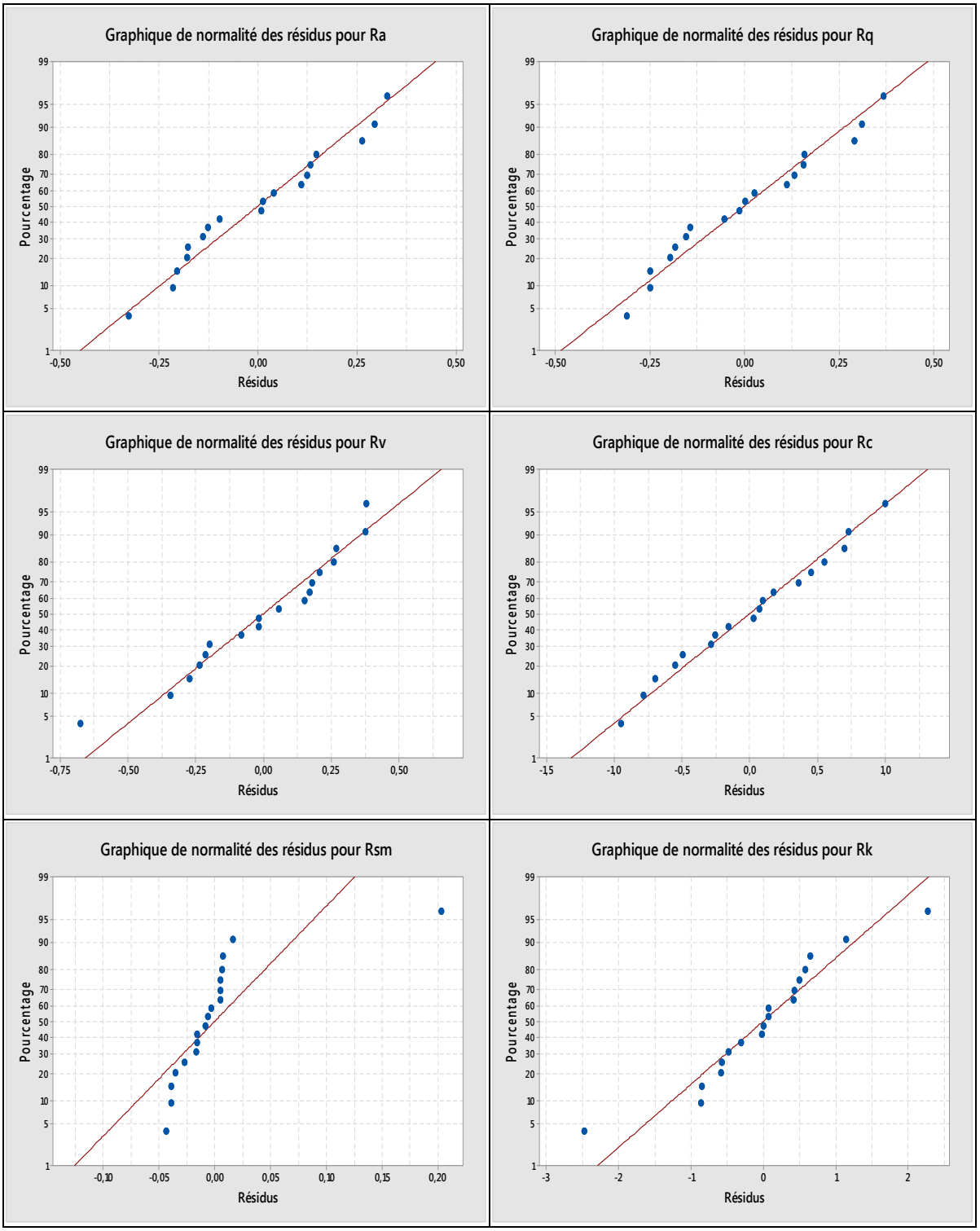
- $R^2 = 55,49\%$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

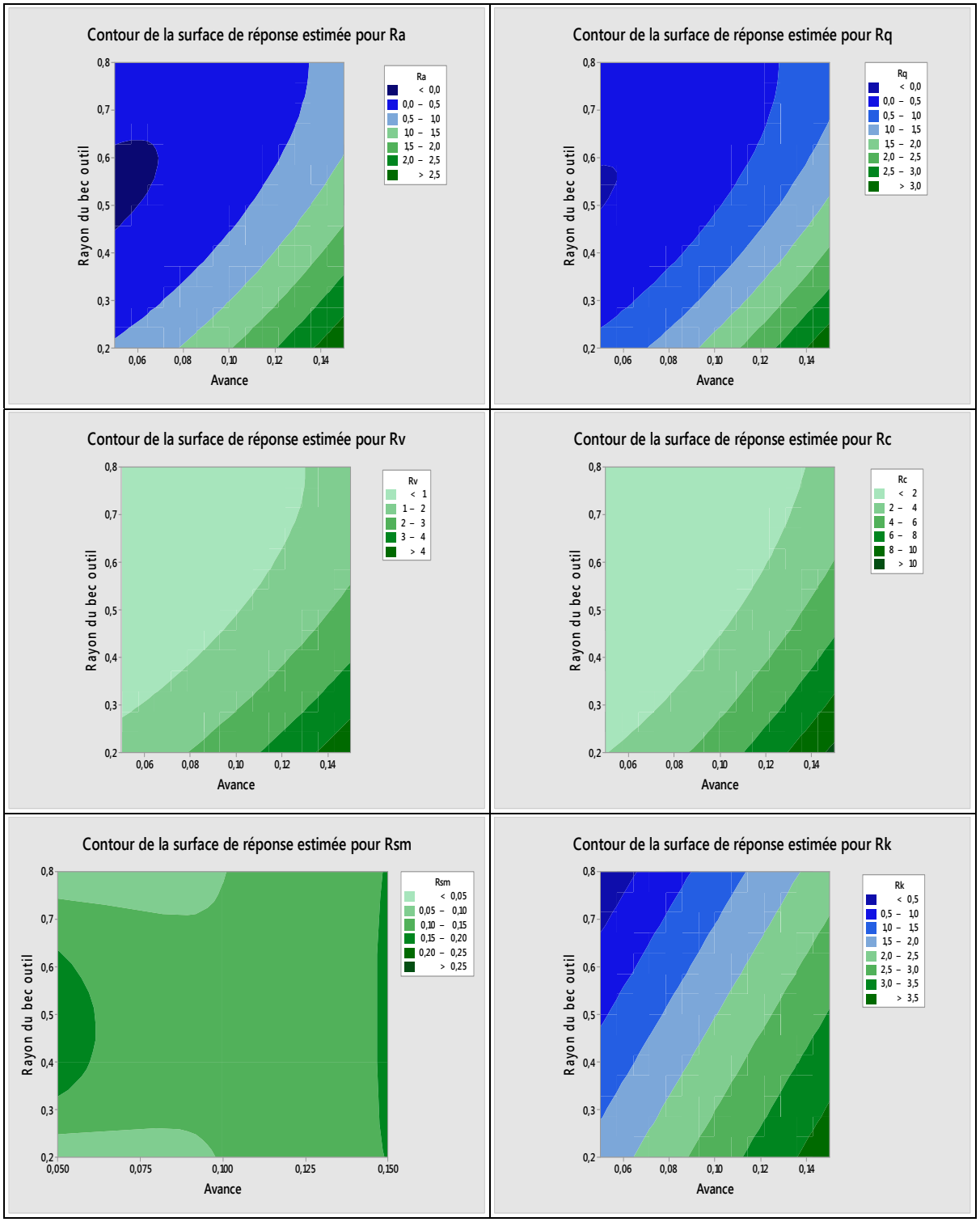
- Observés Vs prédits



- Graphiques de normalité des résidus

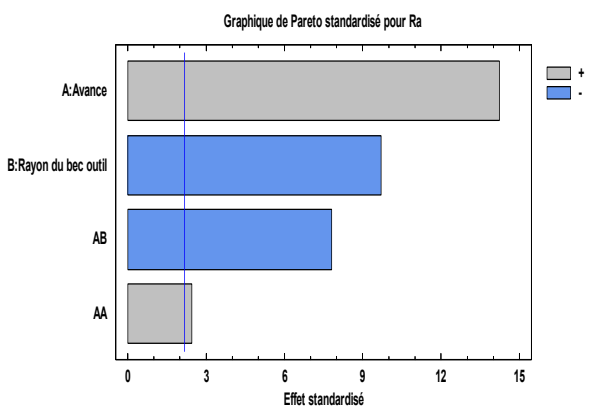


- Graphiques des surfaces de réponses

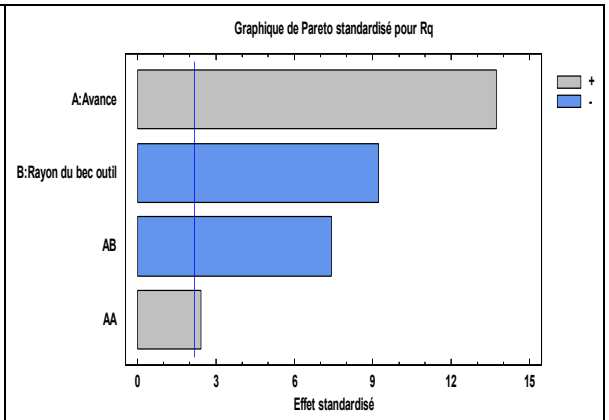


ANNEXE VI

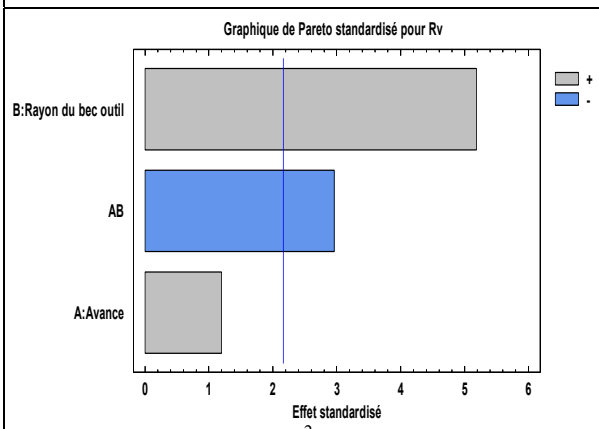
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE SEC DU 7075-T651



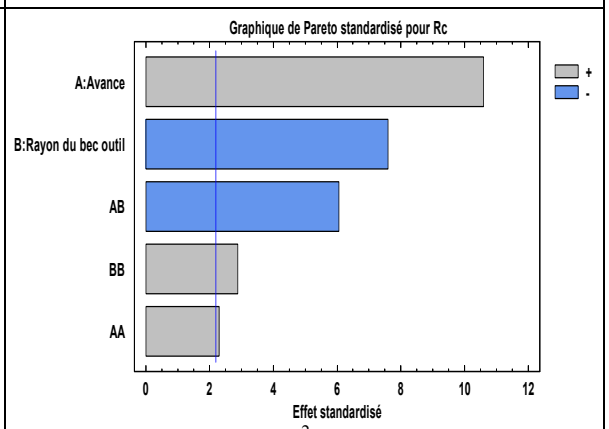
- $R^2 = 95,19\%$



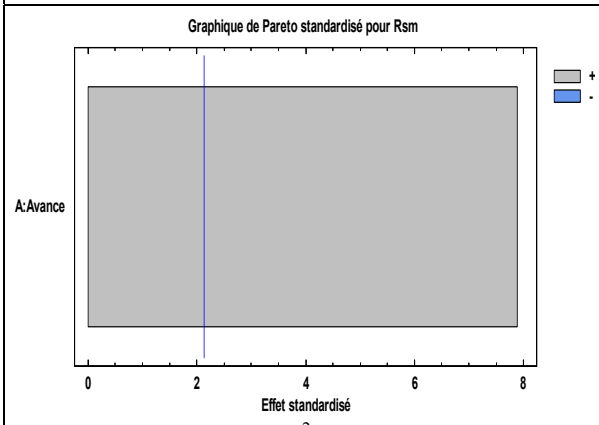
- $R^2 = 94,89\%$



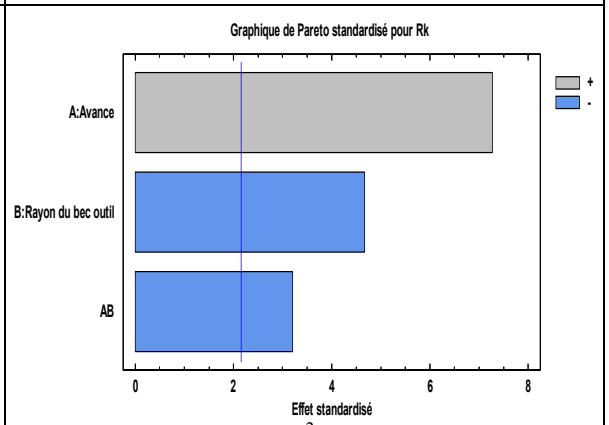
- $R^2 = 80,98\%$



- $R^2 = 95,85\%$

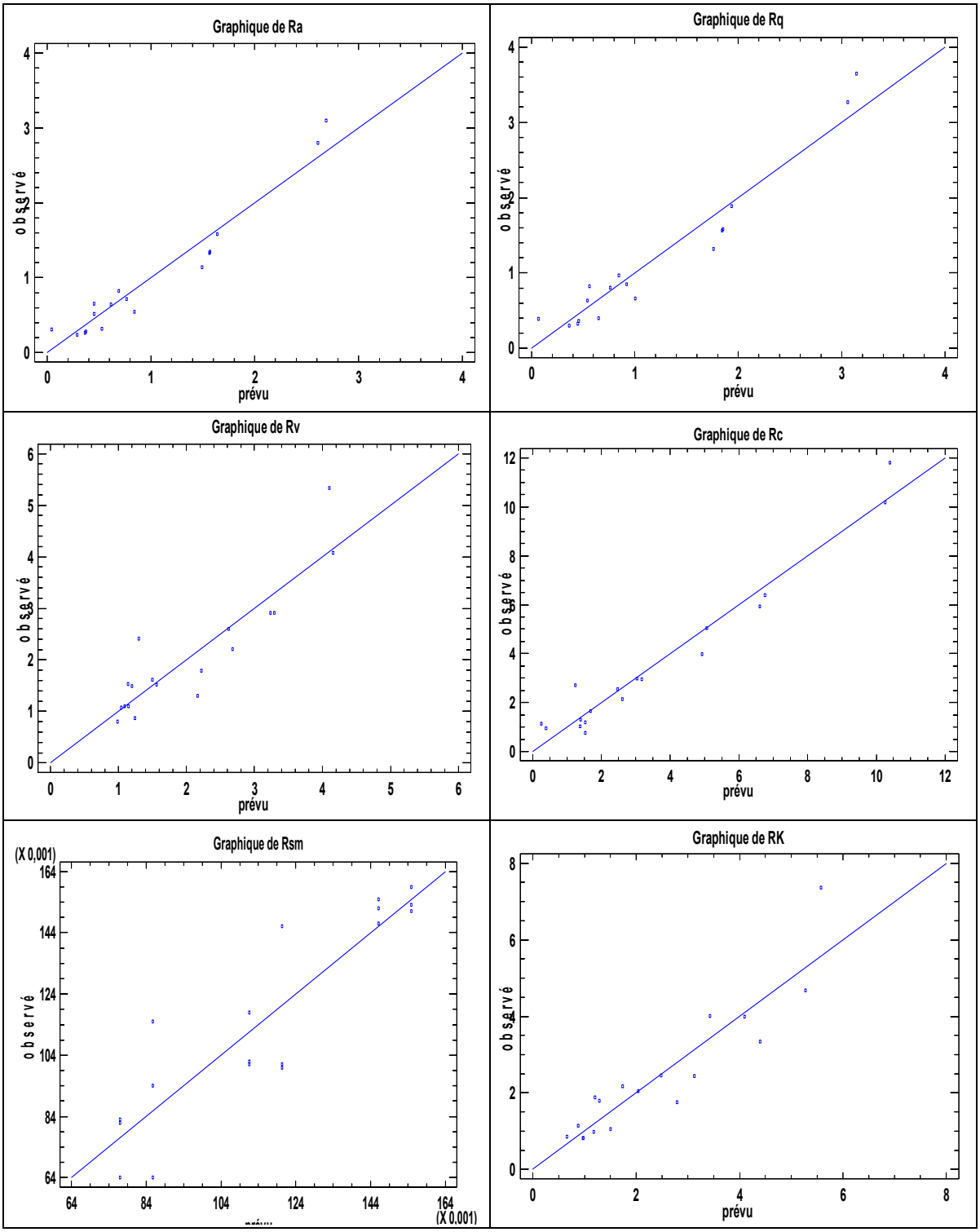


- $R^2 = 80,91\%$

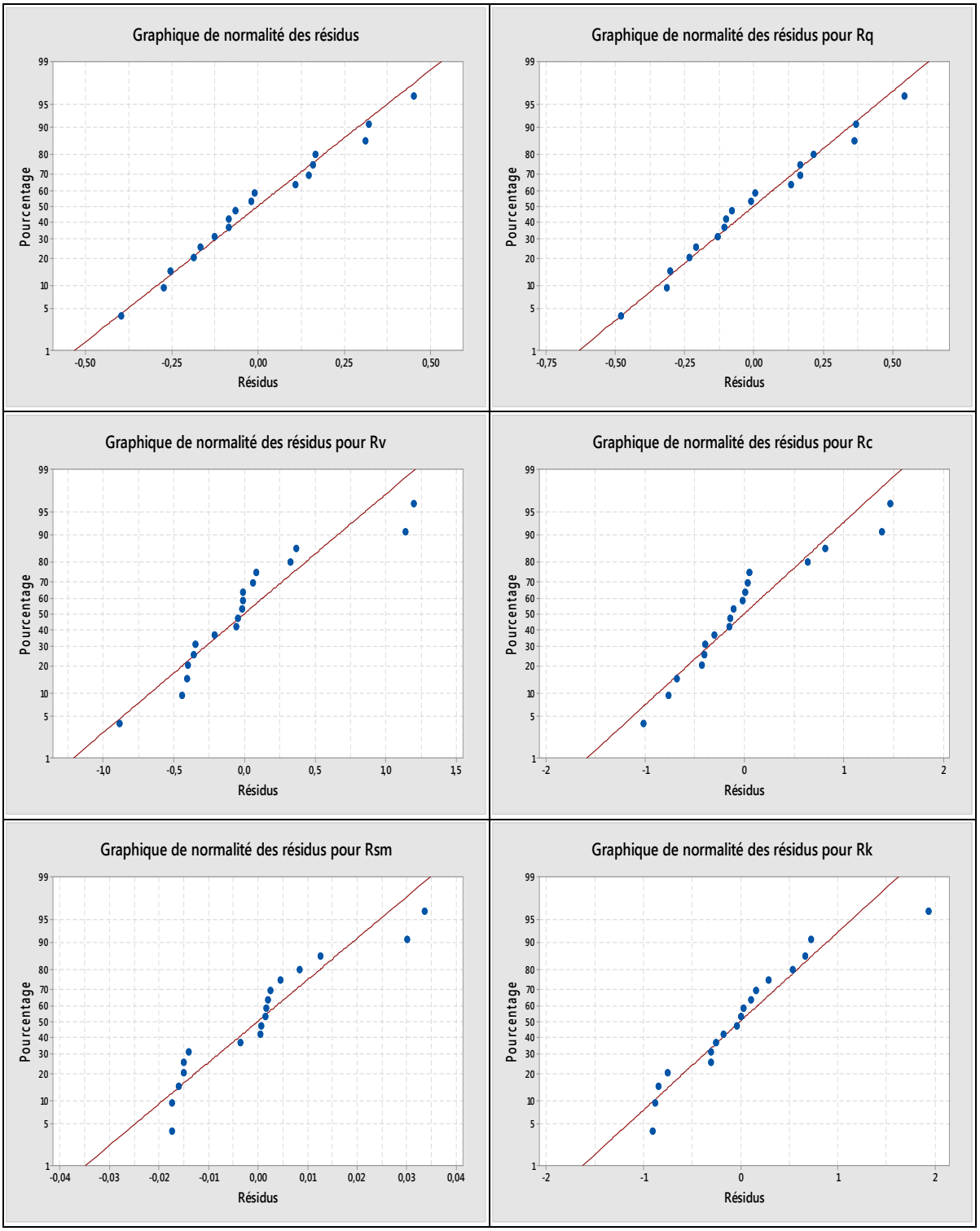


- $R^2 = 84,18\%$

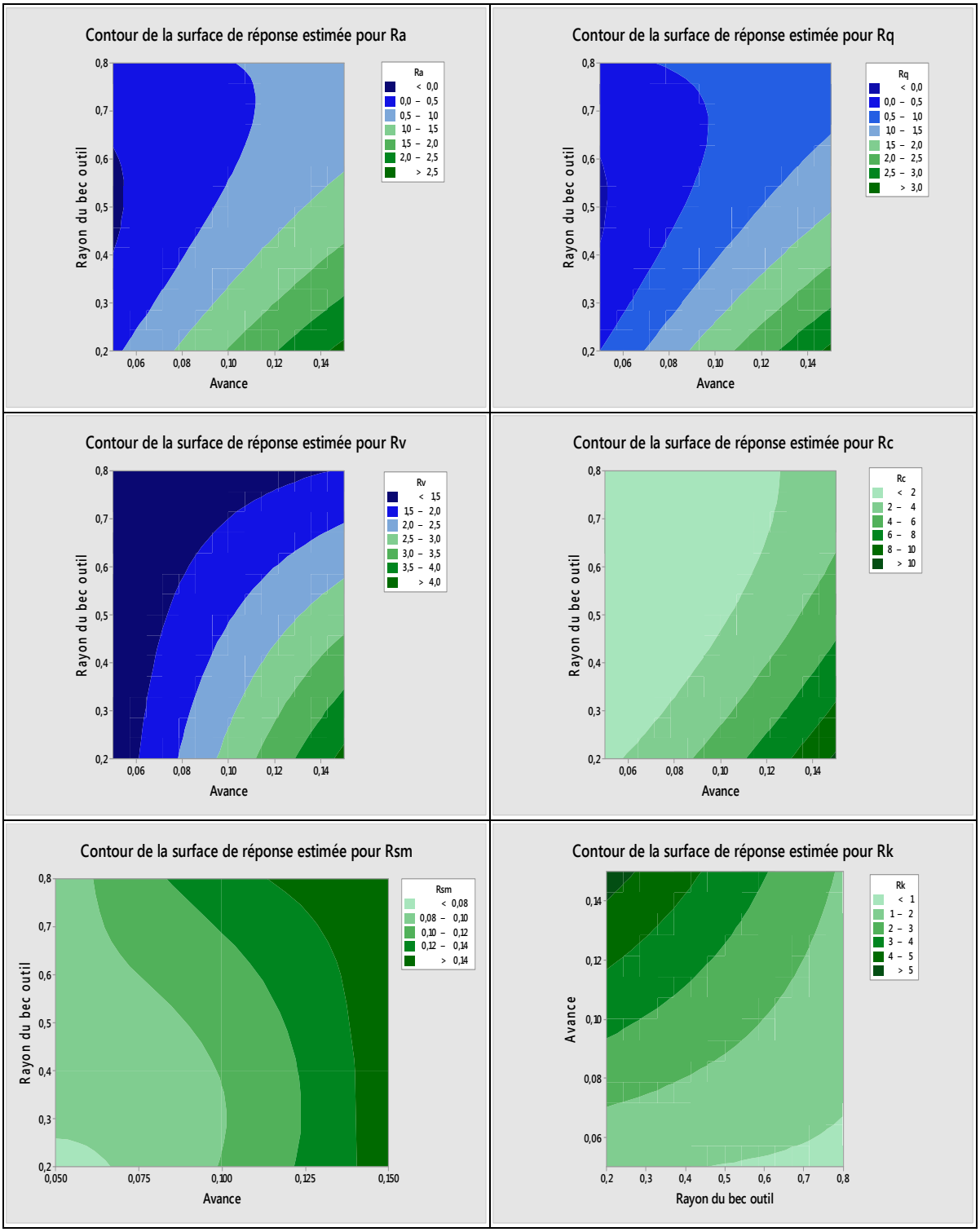
- Observés Vs prédits



- Graphiques de normalité des résidus

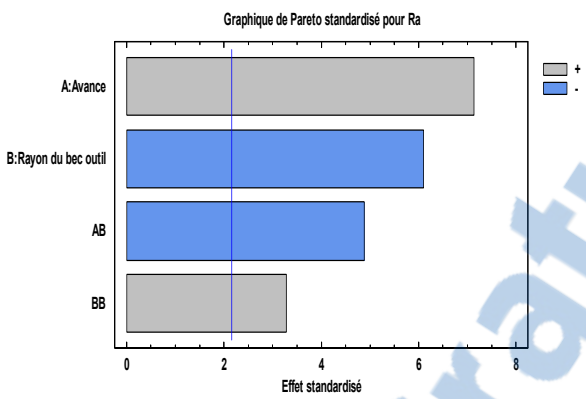


- Graphiques des surfaces de réponses

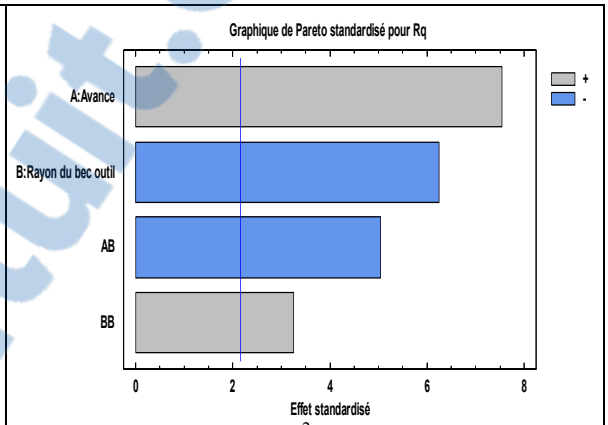


ANNEXE VII

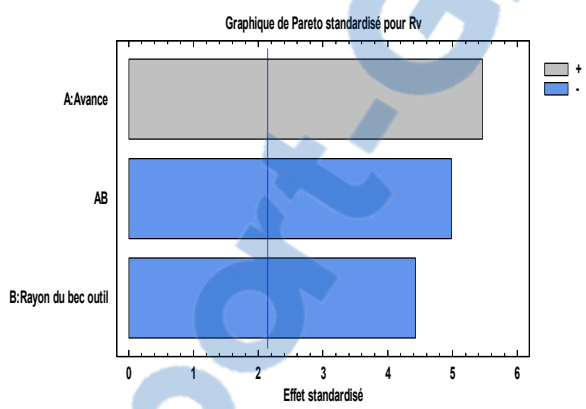
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ MINIMALE DE LUBRIFICATION DU 7075-T651



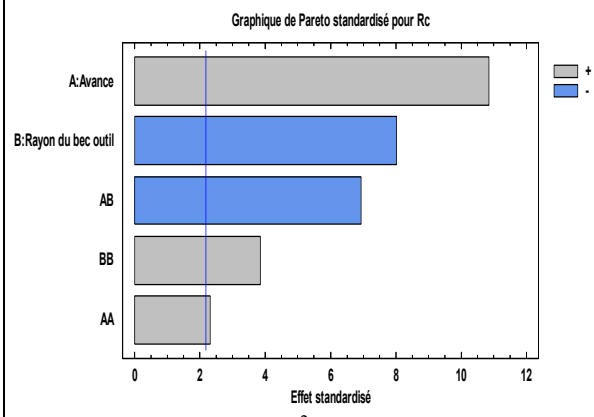
- $R^2 = 90{,}92\%$



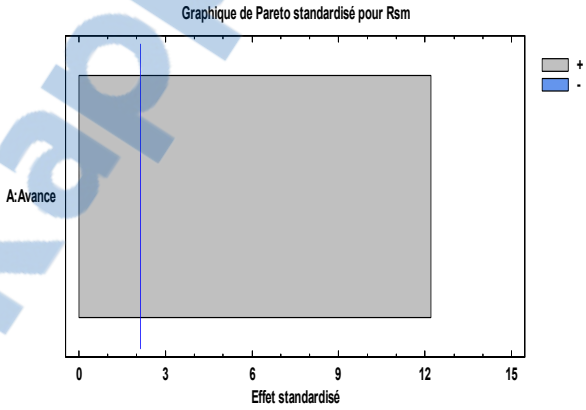
- $R^2 = 91{,}52\%$



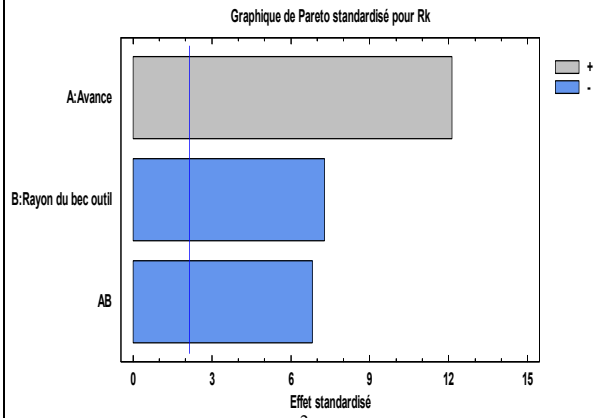
- $R^2 = 85{,}71\%$



- $R^2 = 95{,}67\%$



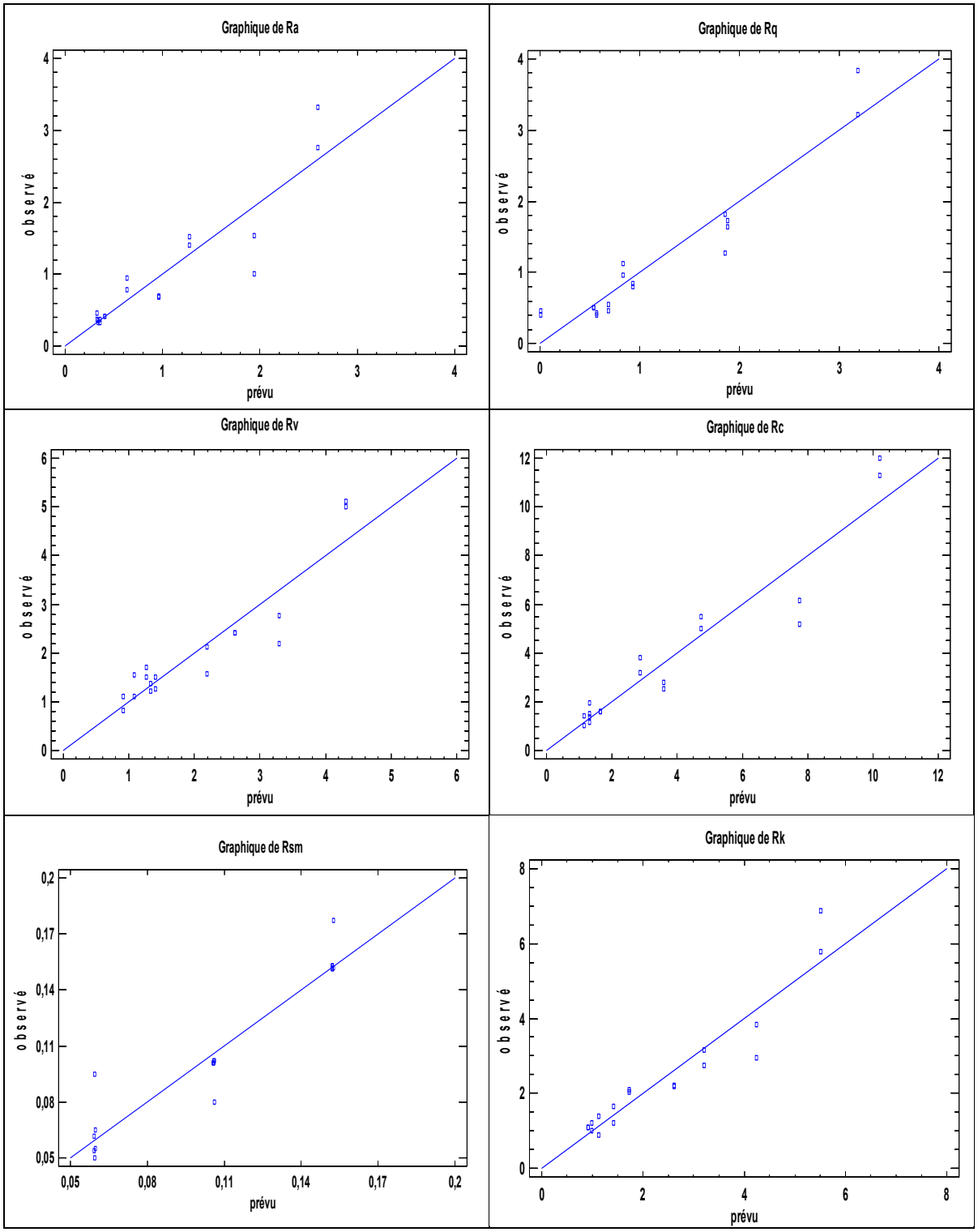
- $R^2 = 90{,}89\%$



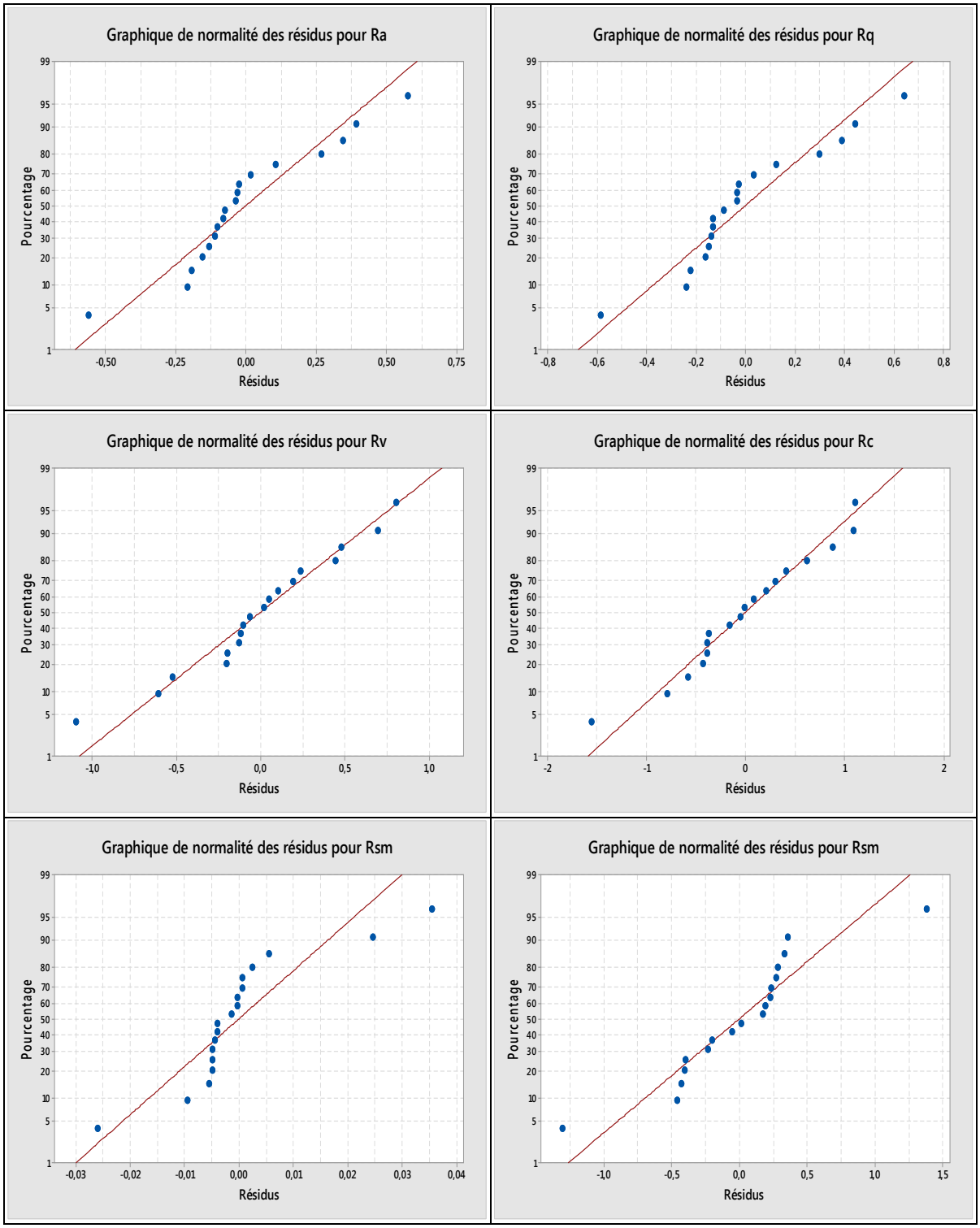
- $R^2 = 89{,}73\%$

Rapport-Gratuit.com

- Observés Vs prédits

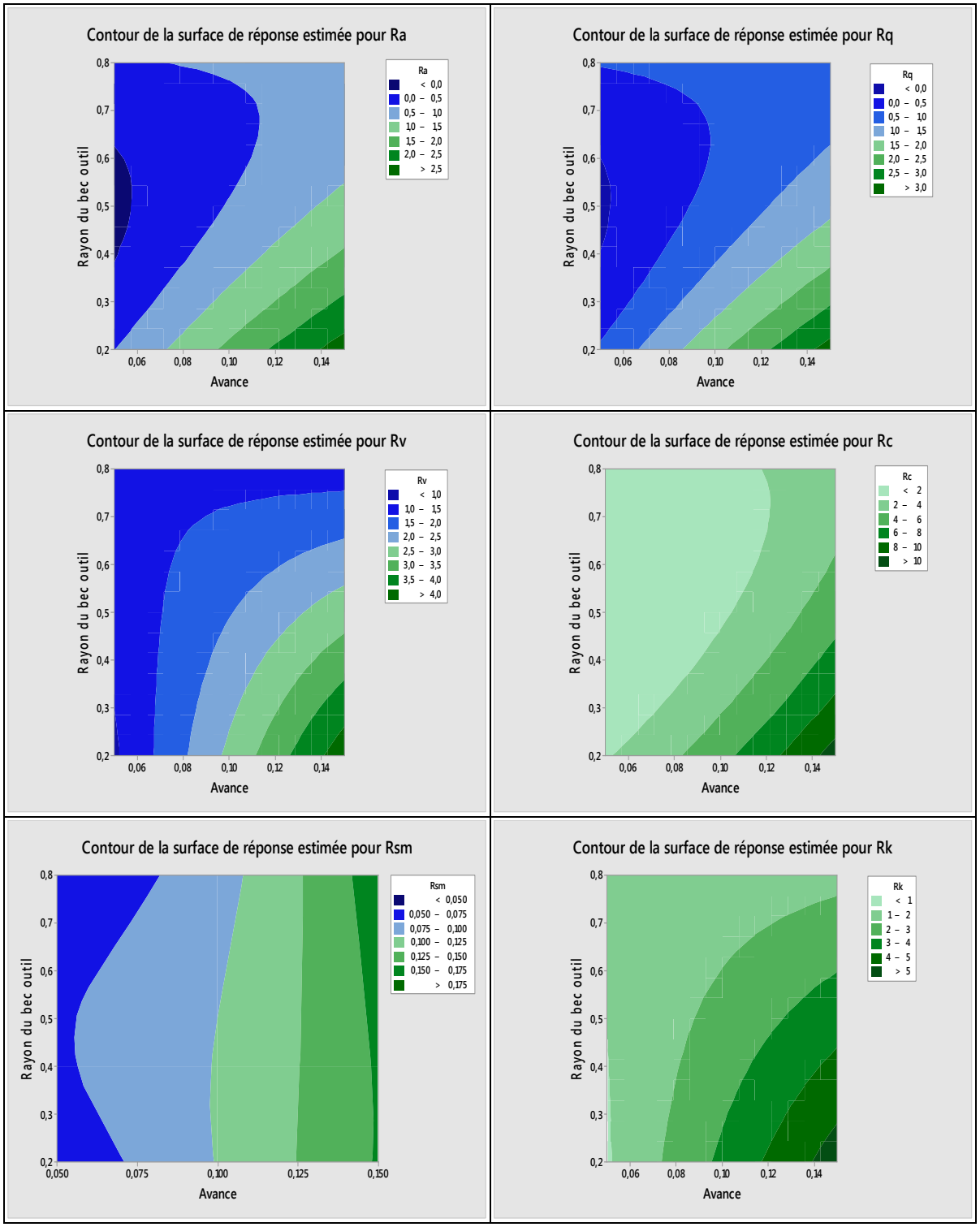


- Graphique de normalité des résidus



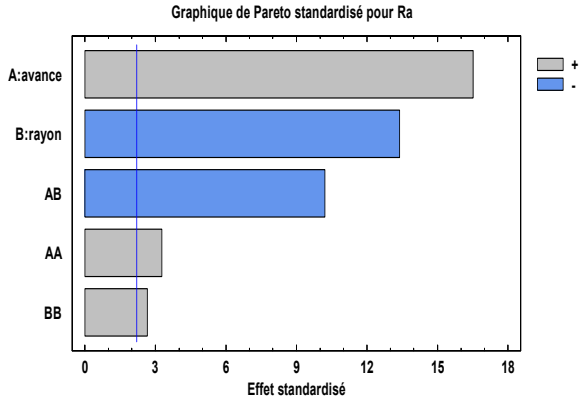
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Graphiques des surfaces de réponses

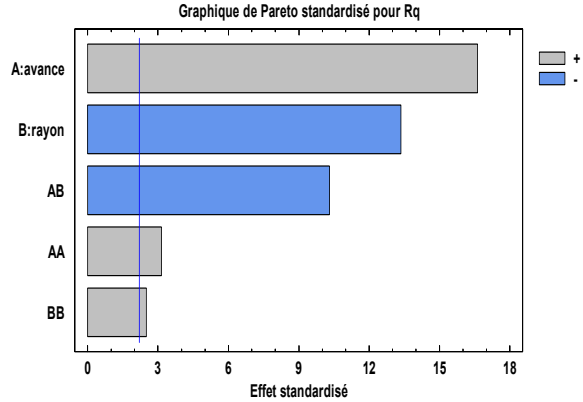


ANNEXE VIII

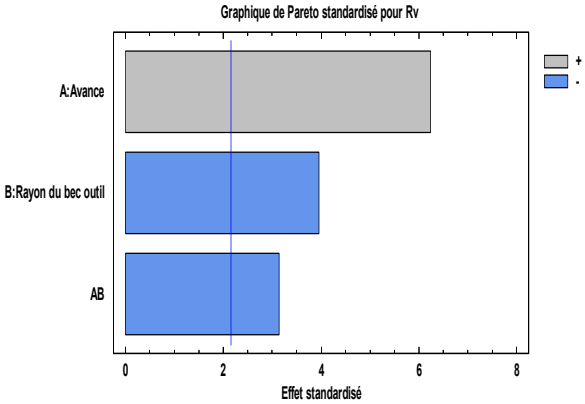
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 7075-T651



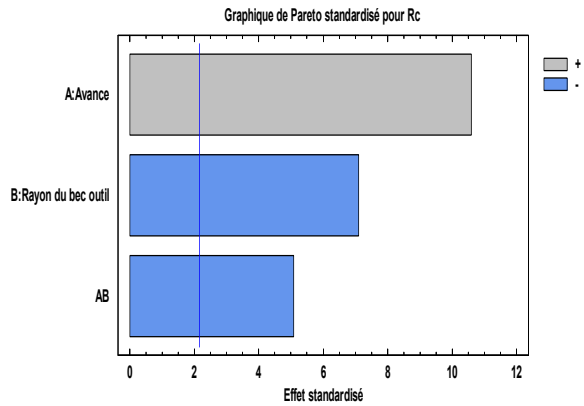
- R^2 =96,80%



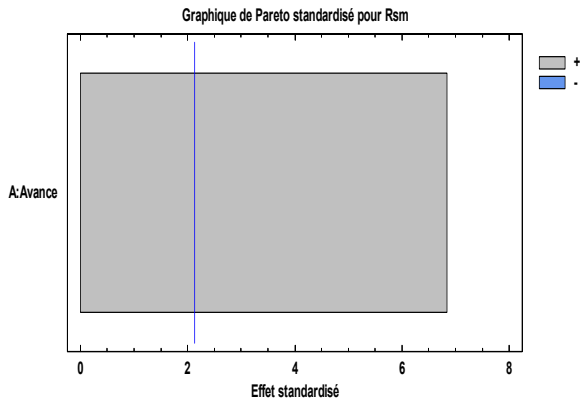
- R^2 =96,94%



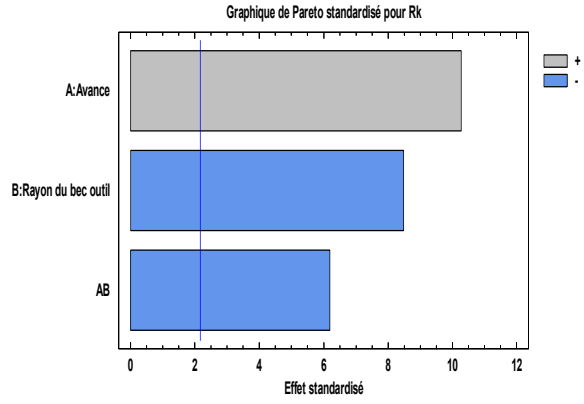
- R^2 =88,99%



- R^2 =92,41%

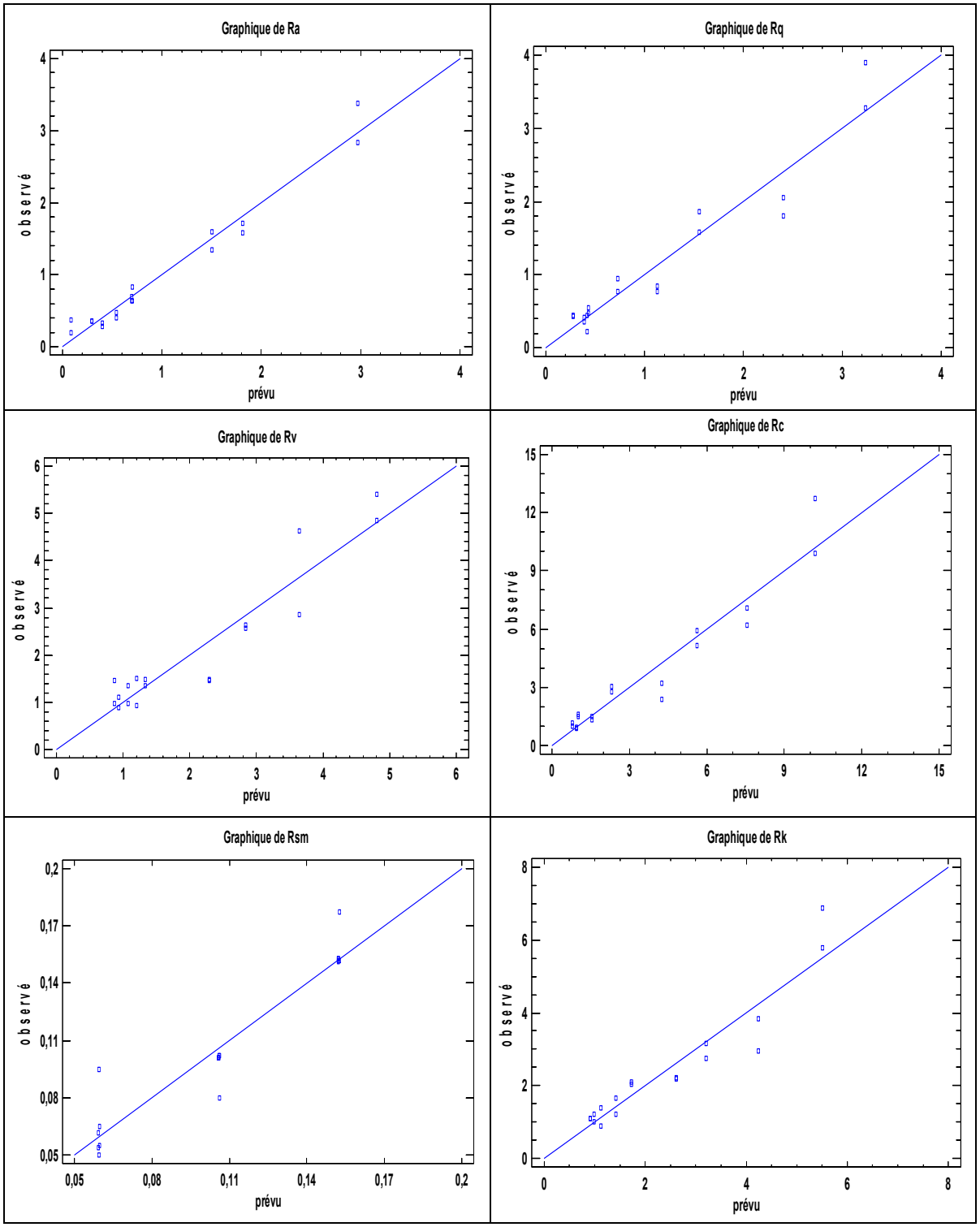


- R^2 =74,84%

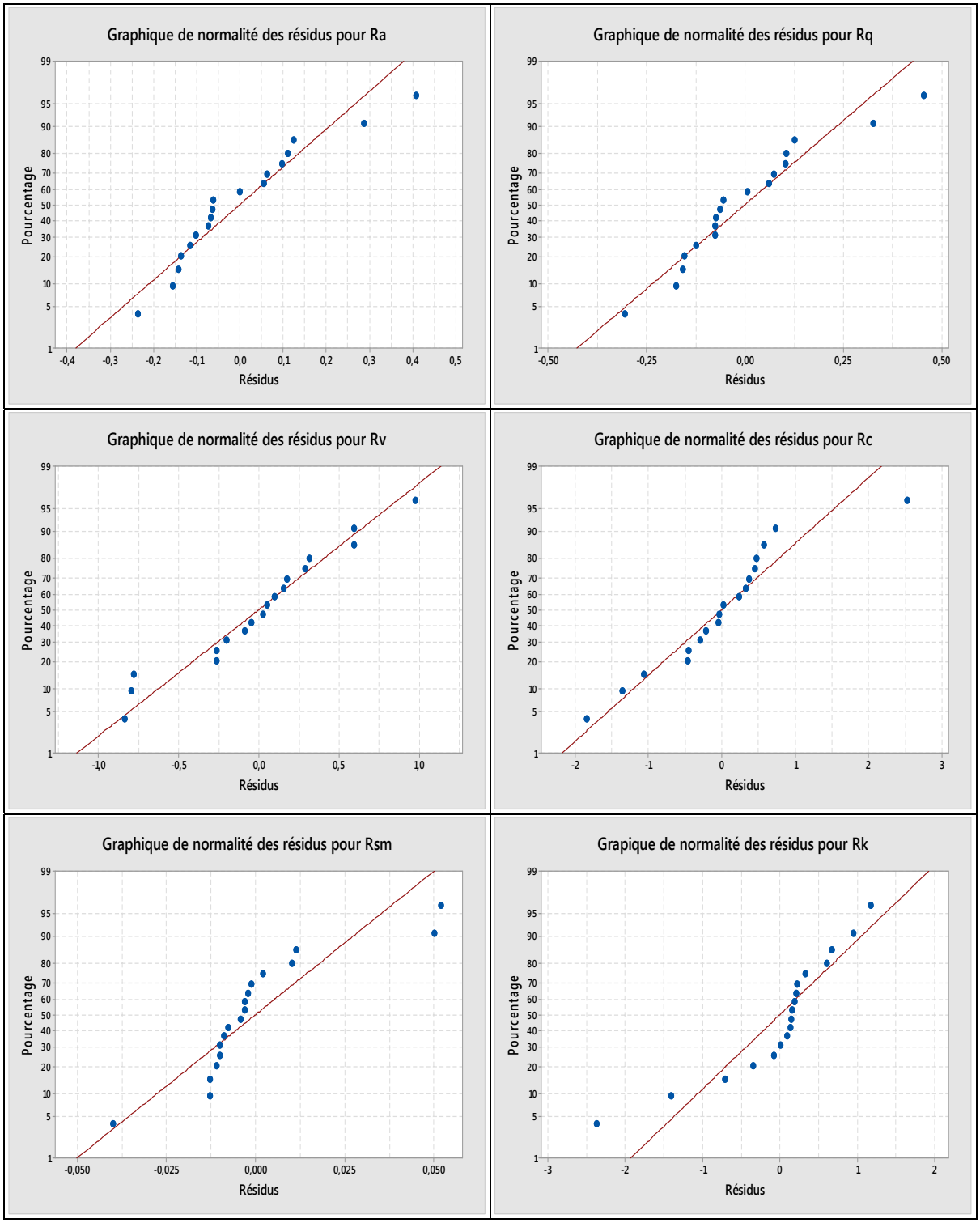


- R^2 =84%

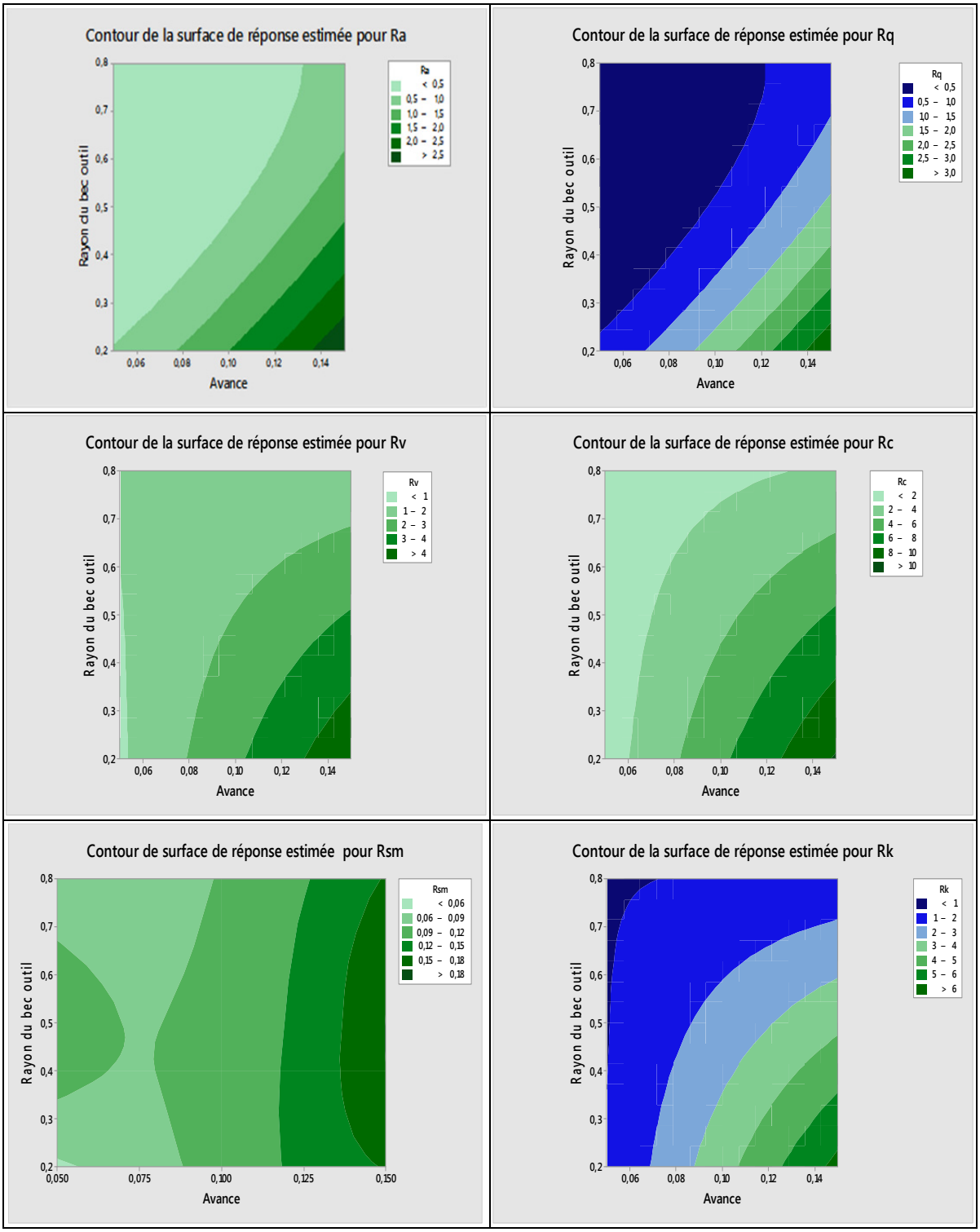
- Observés Vs prédits



- Graphiques de normalité des résidus

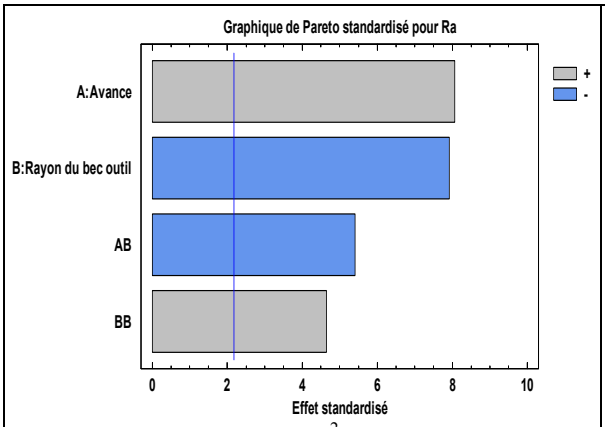


- Graphiques des surfaces de réponses

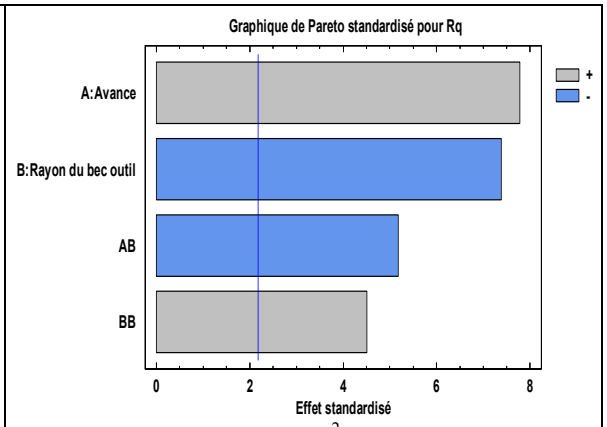


ANNEXE IX

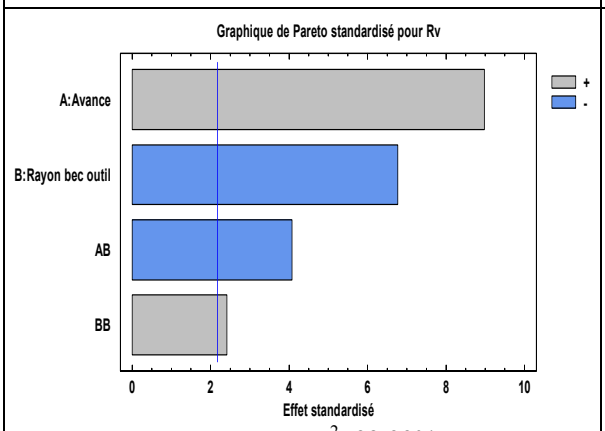
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À QUANTITÉ MINIMALE DE LUBRIFICATION DU 2024-T4



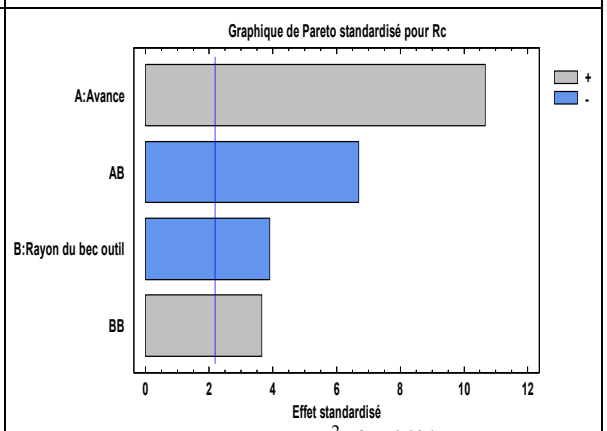
- R^2=93,33%



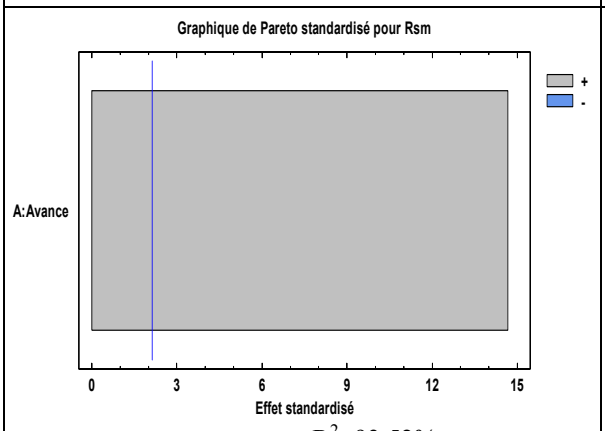
- R^2=93,24%



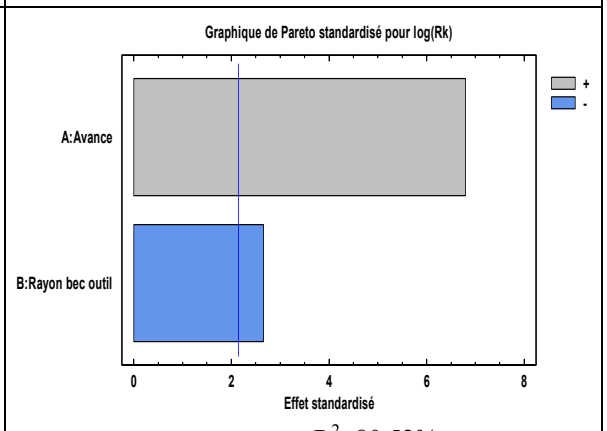
- R^2=92,99%



- R^2=95,44%

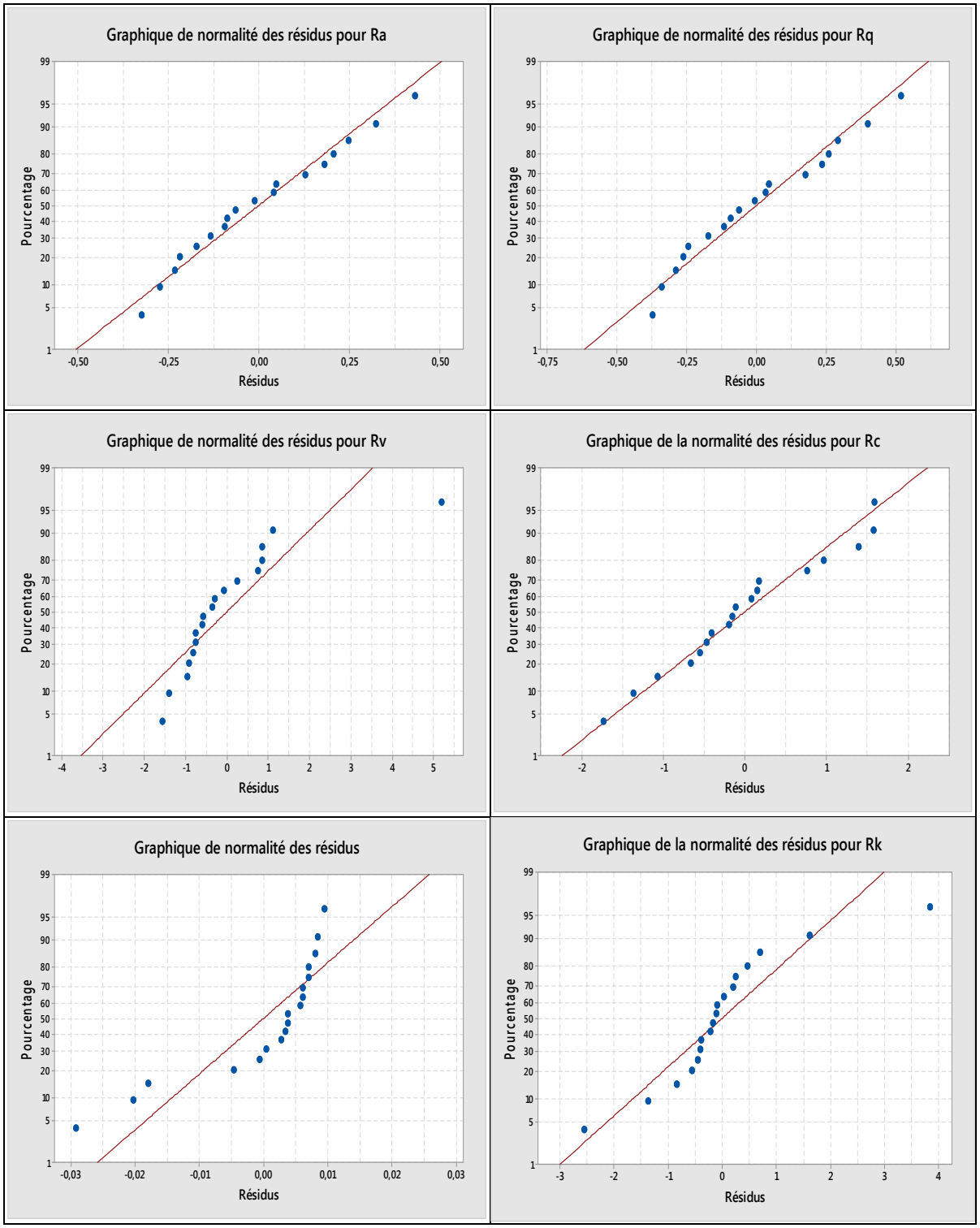


- R^2=93,52%

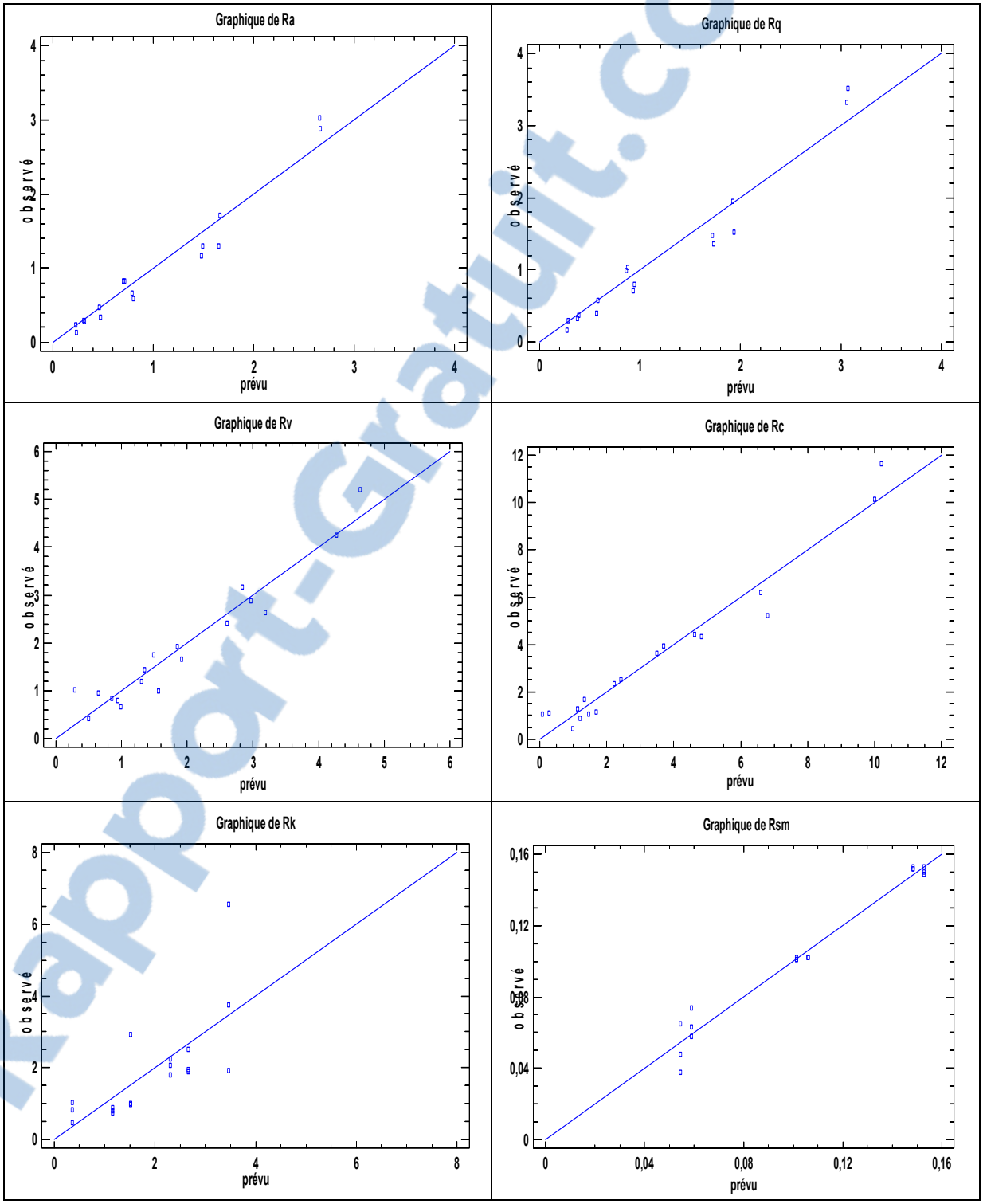


- R^2=80,52%

- Graphiques de normalité des résidus

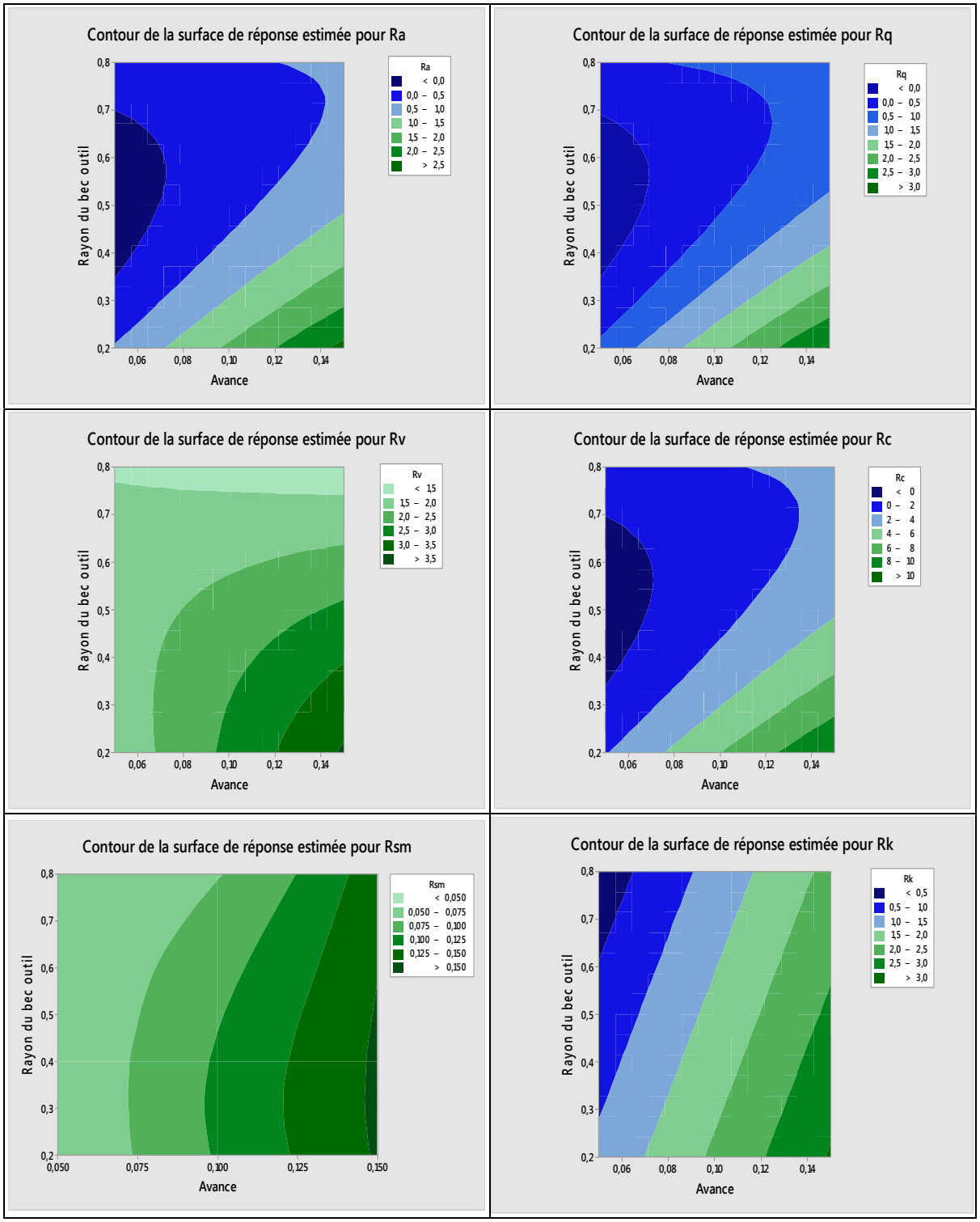


- Observés Vs prédits



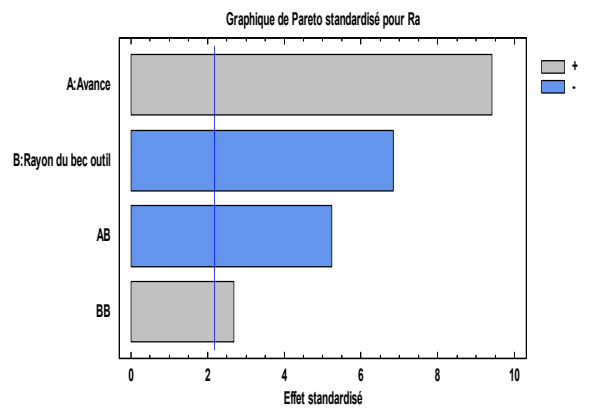
Rapport-Gratuit.com

- Graphiques de surfaces de réponses

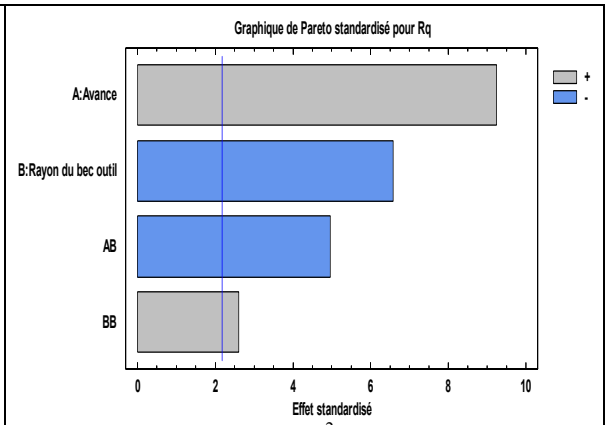


ANNEXE X

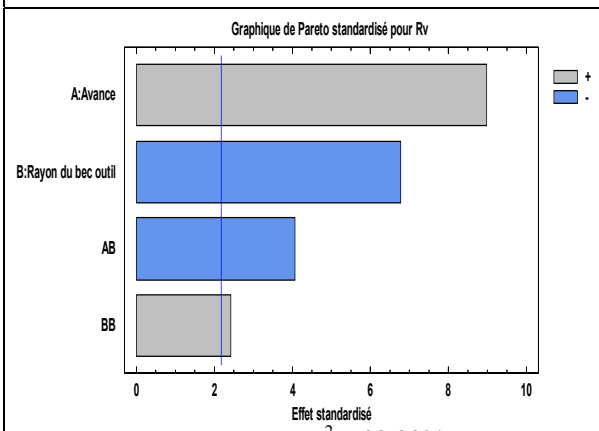
RÉSULTATS RELATIFS À L'ÉTUDE DE LA RUGOSITÉ EN USINAGE À LUBRIFICATION ABONDANTE DU 2024-T4



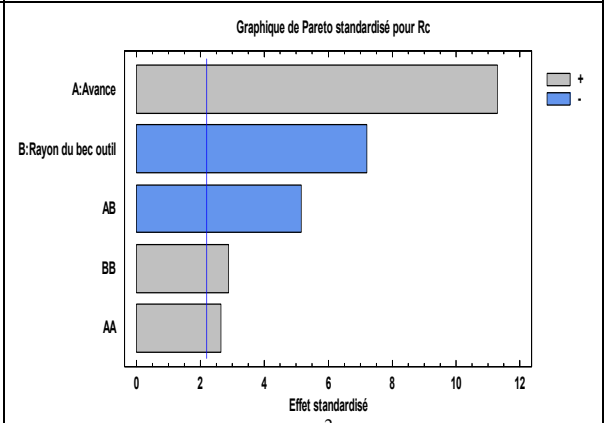
- $R^2 = 93,76\%$



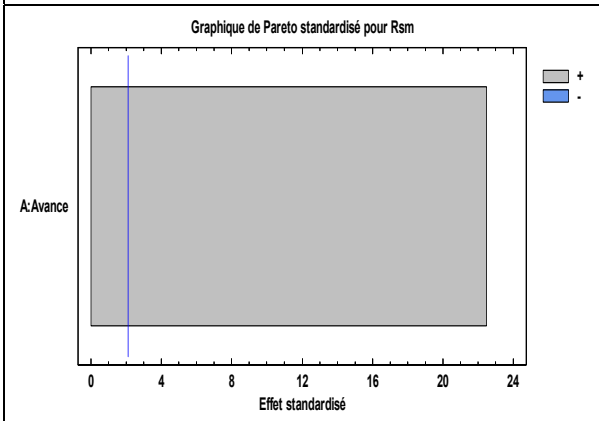
- $R^2 = 93,39\%$



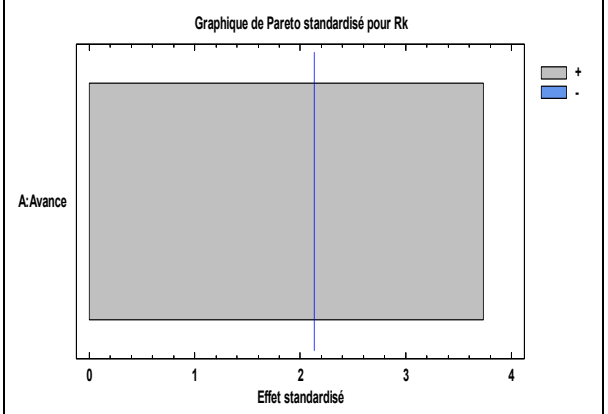
- $R^2 = 92,99\%$



- $R^2 = 95,51\%$



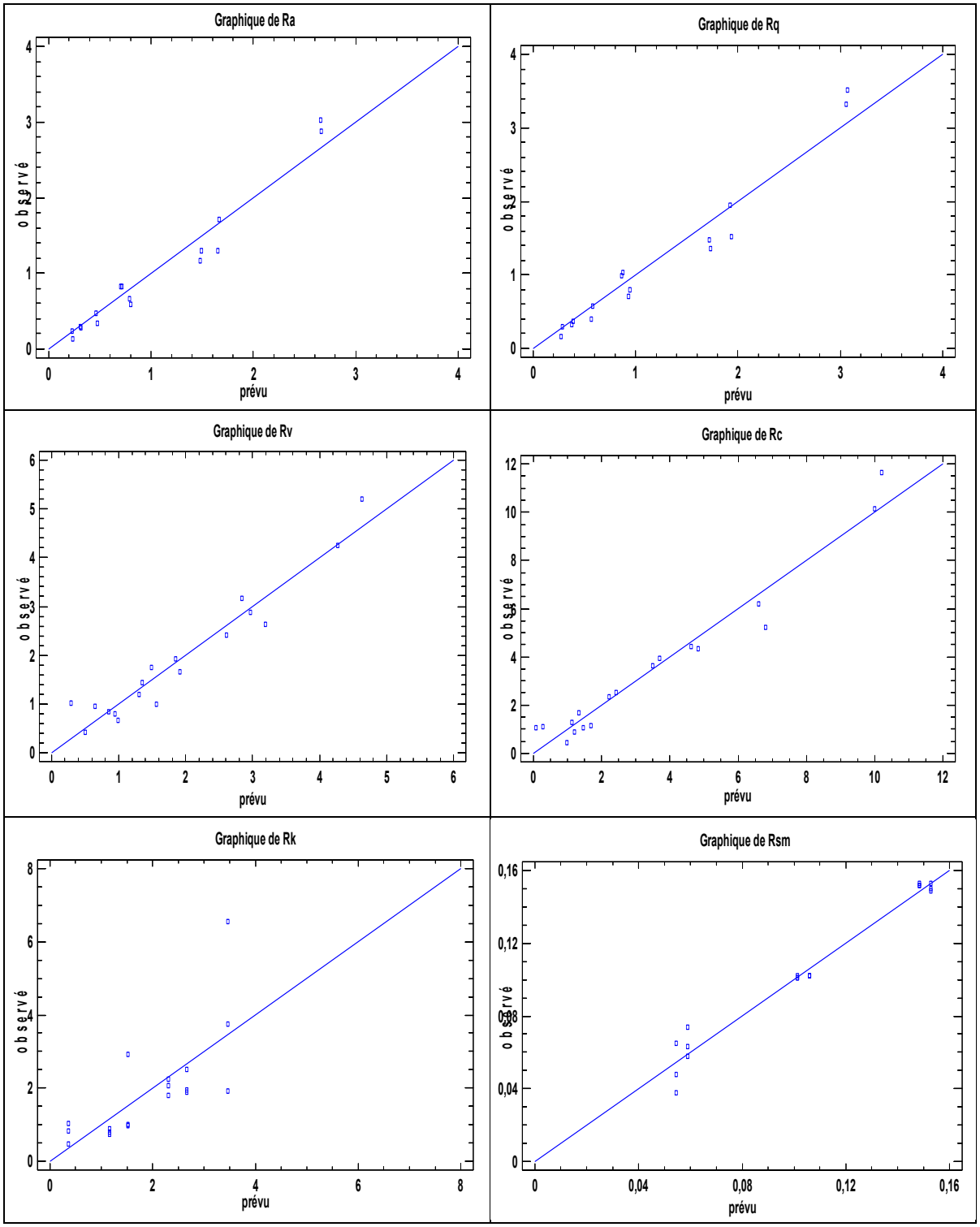
- $R^2 = 97,12\%$



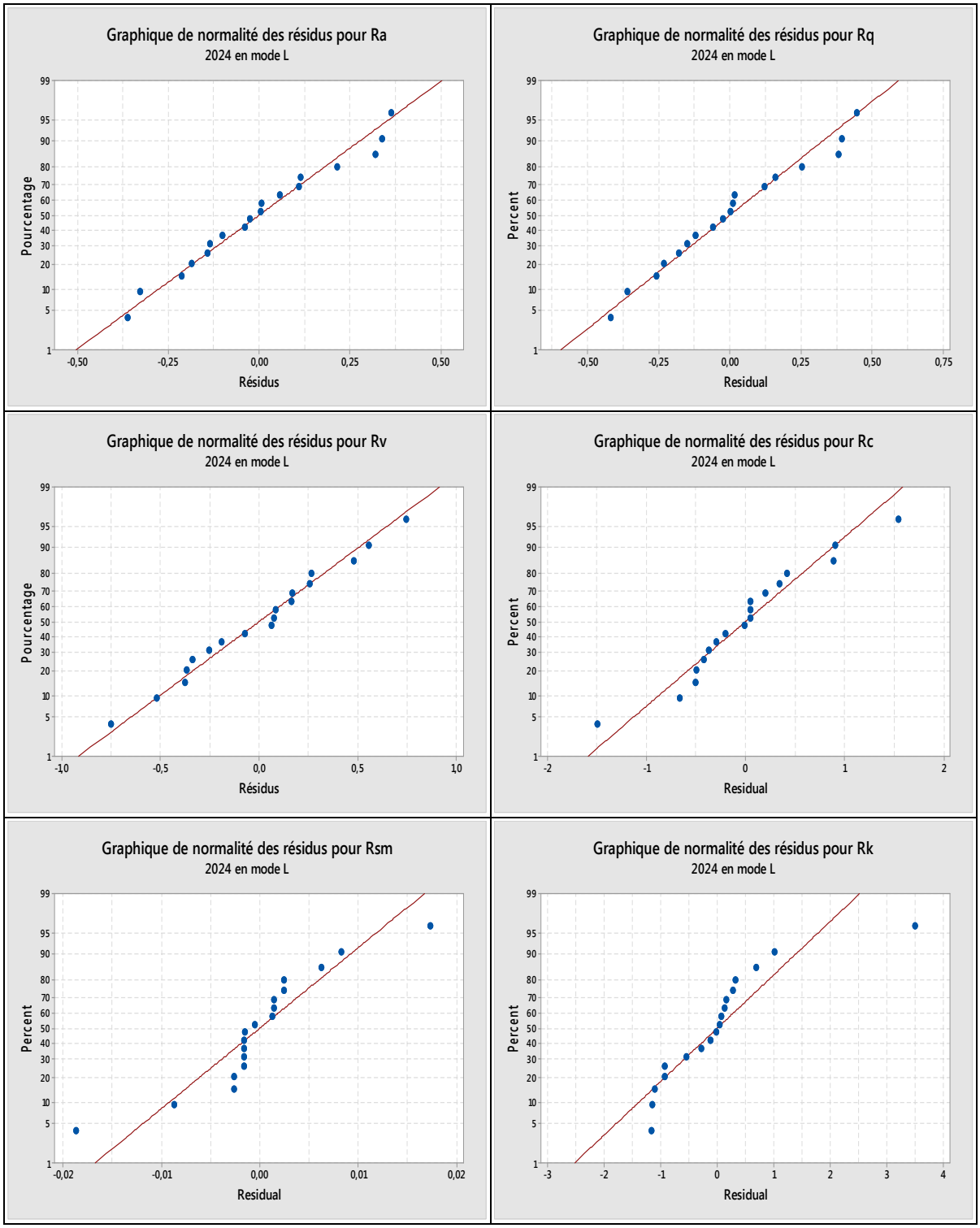
- $R^2 = 52,27\%$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

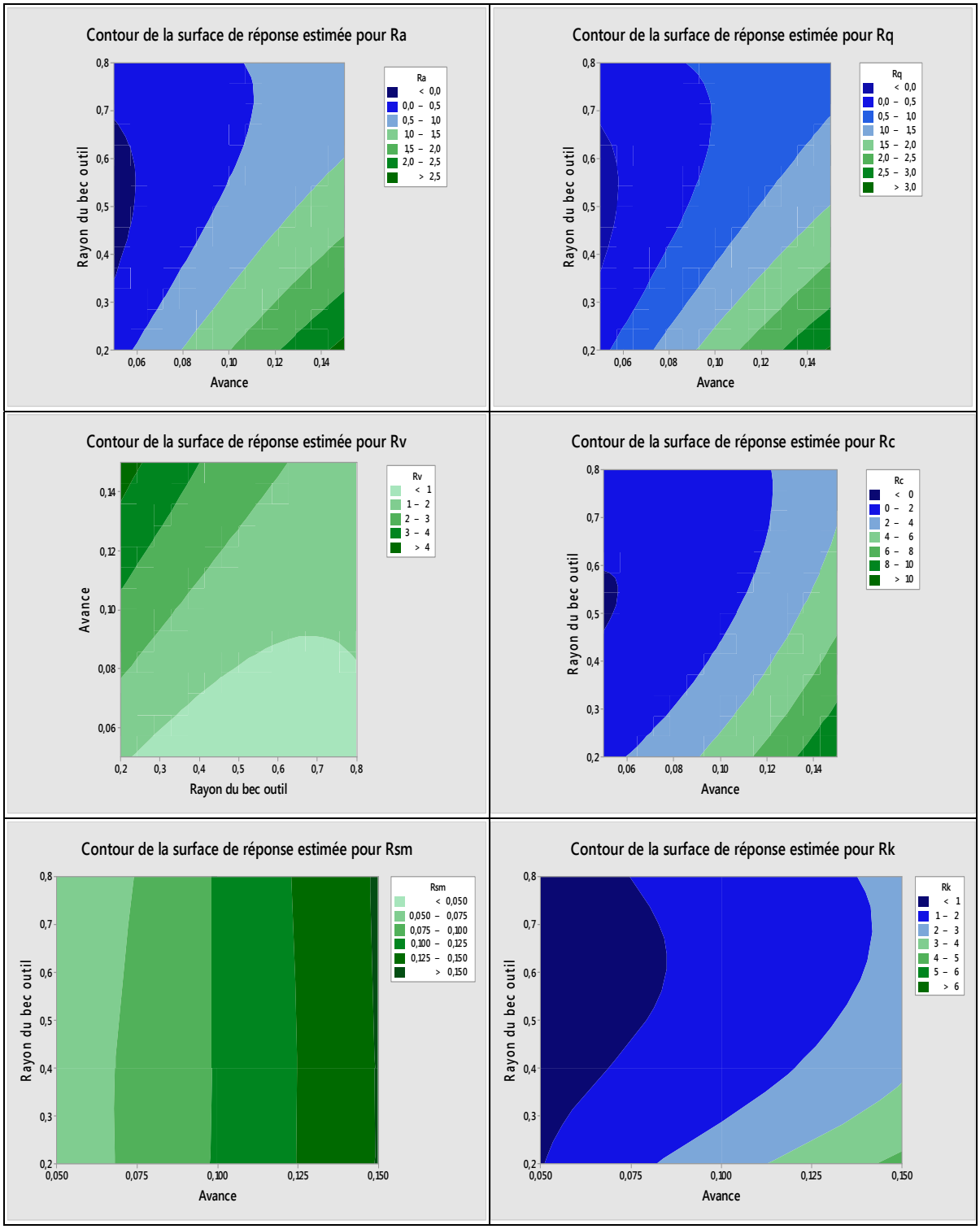
- Observés Vs Prédits



- Graphiques de normalité des résidus

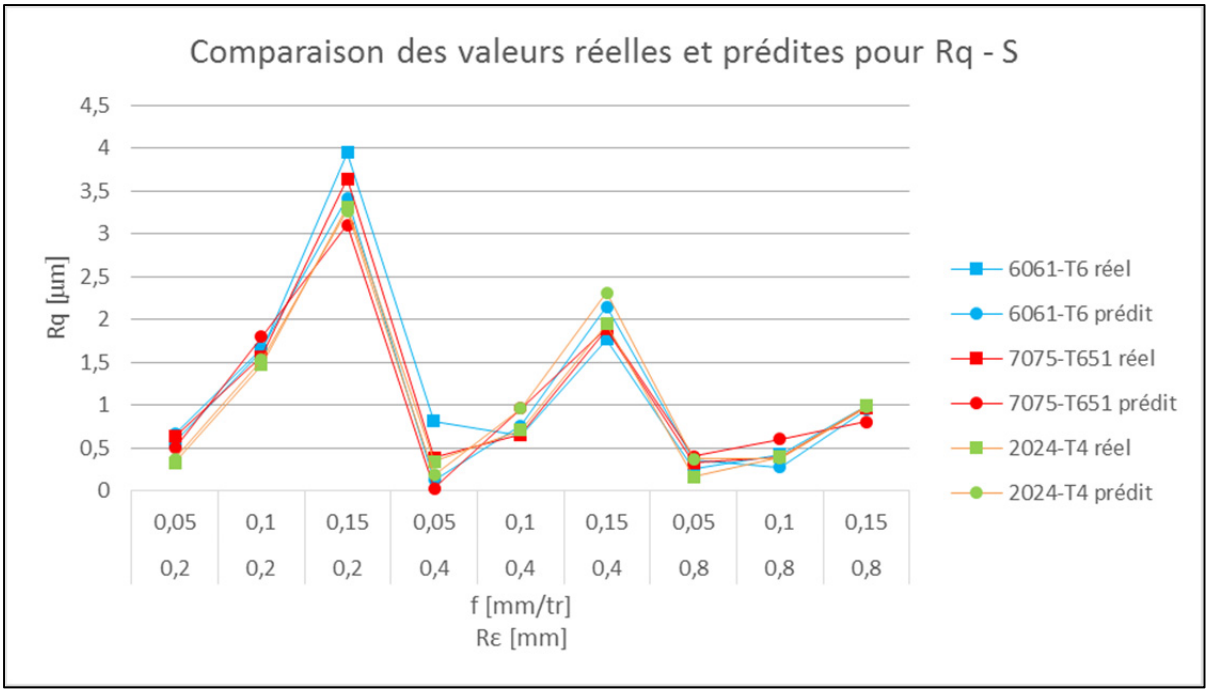


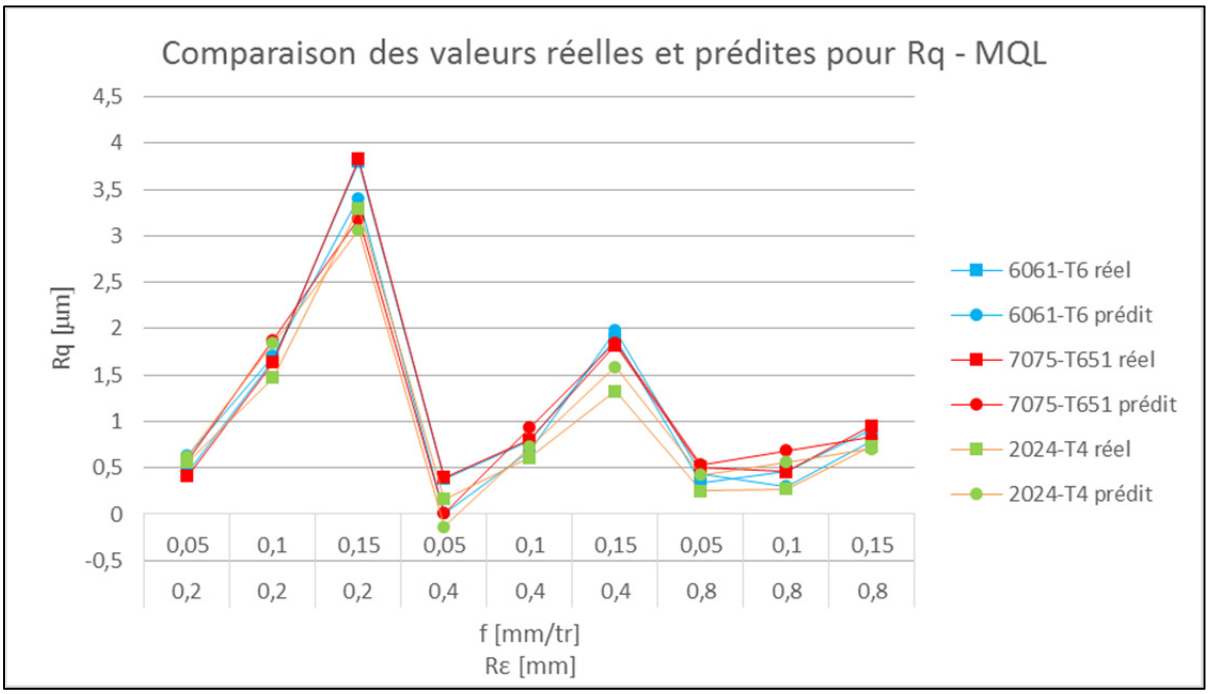
- Graphiques de surface de réponses

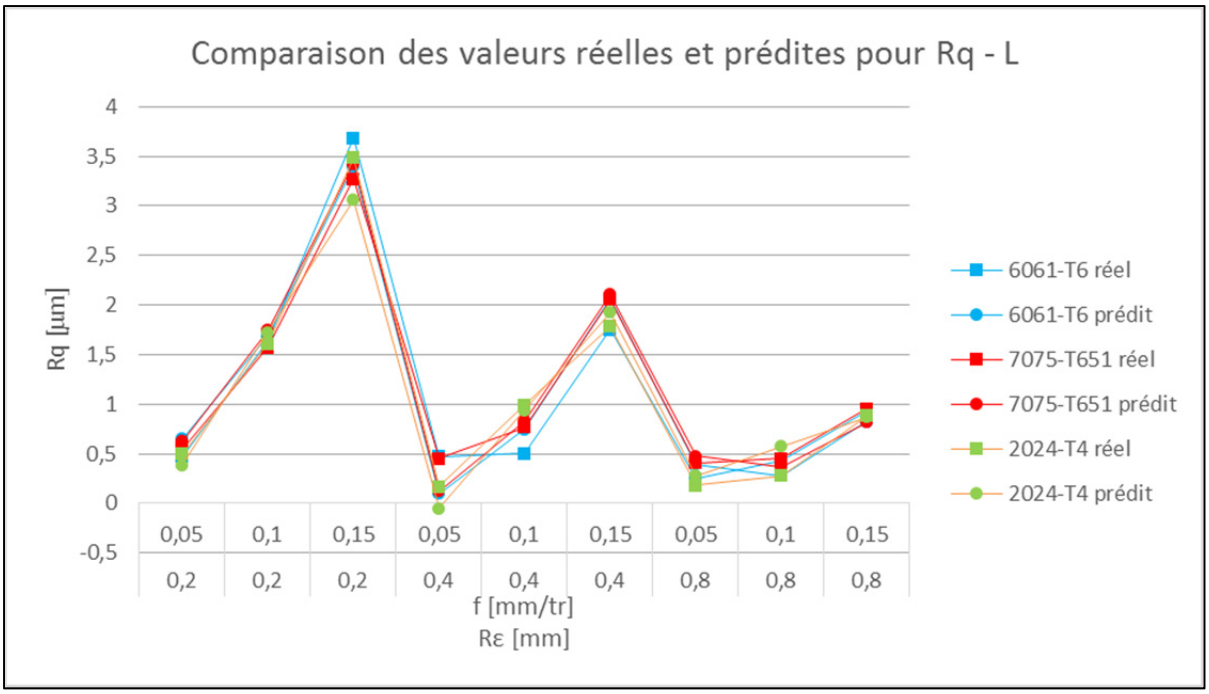


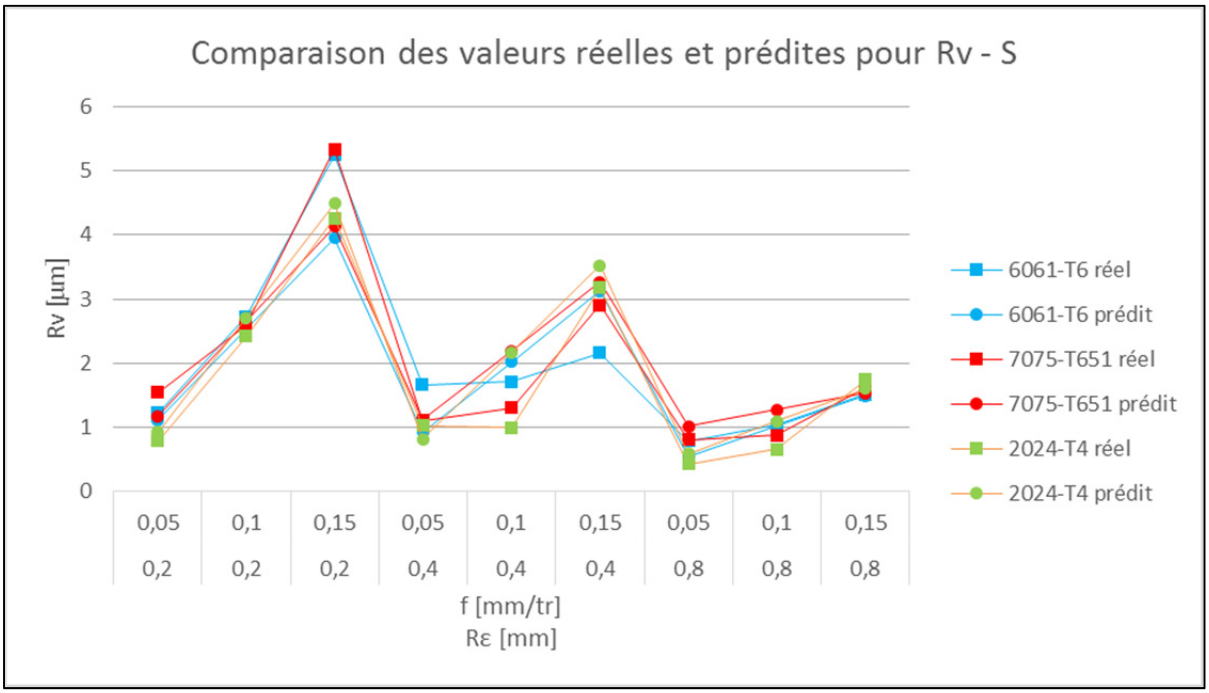
ANNEXE XI

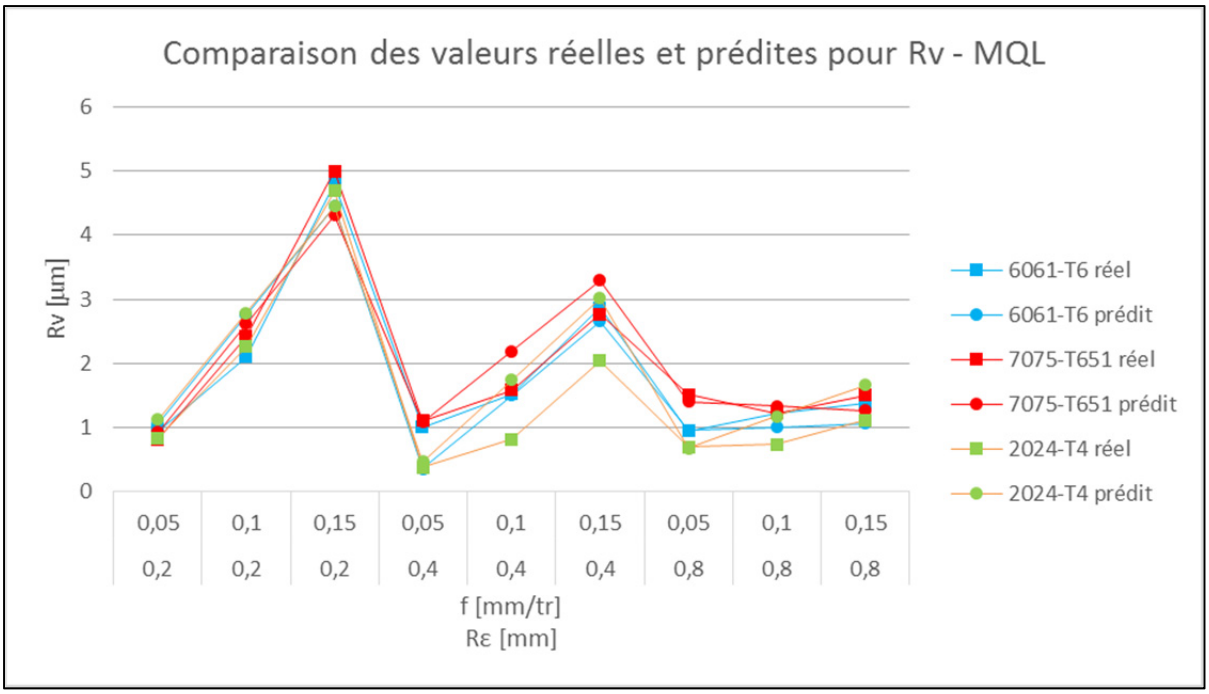
GRAPHIQUES DE COMPARAISON ENTRE LES VALEURS PRÉDITES ET RÉELLES DES PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ

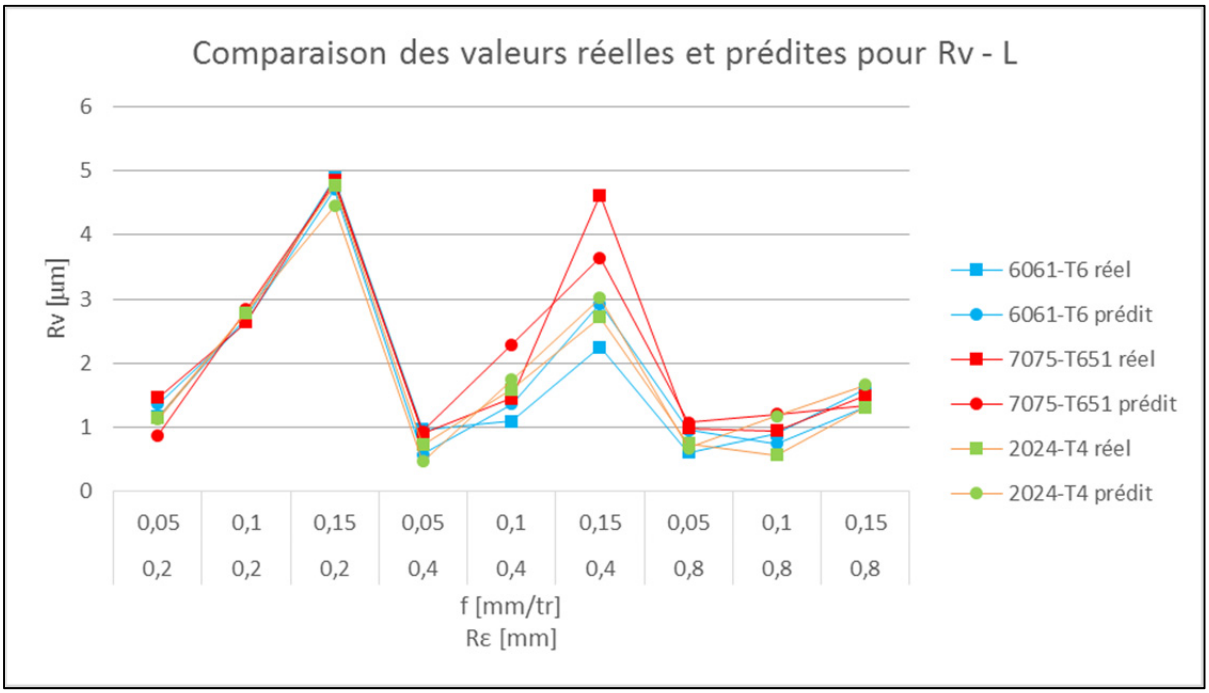


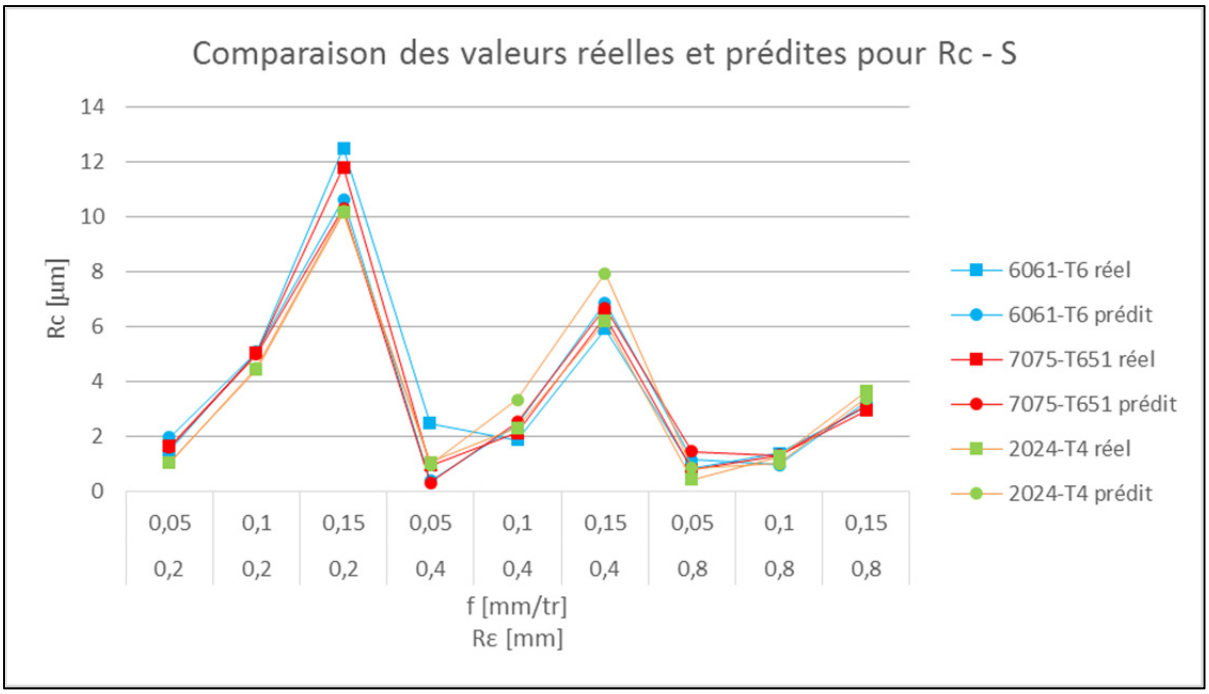


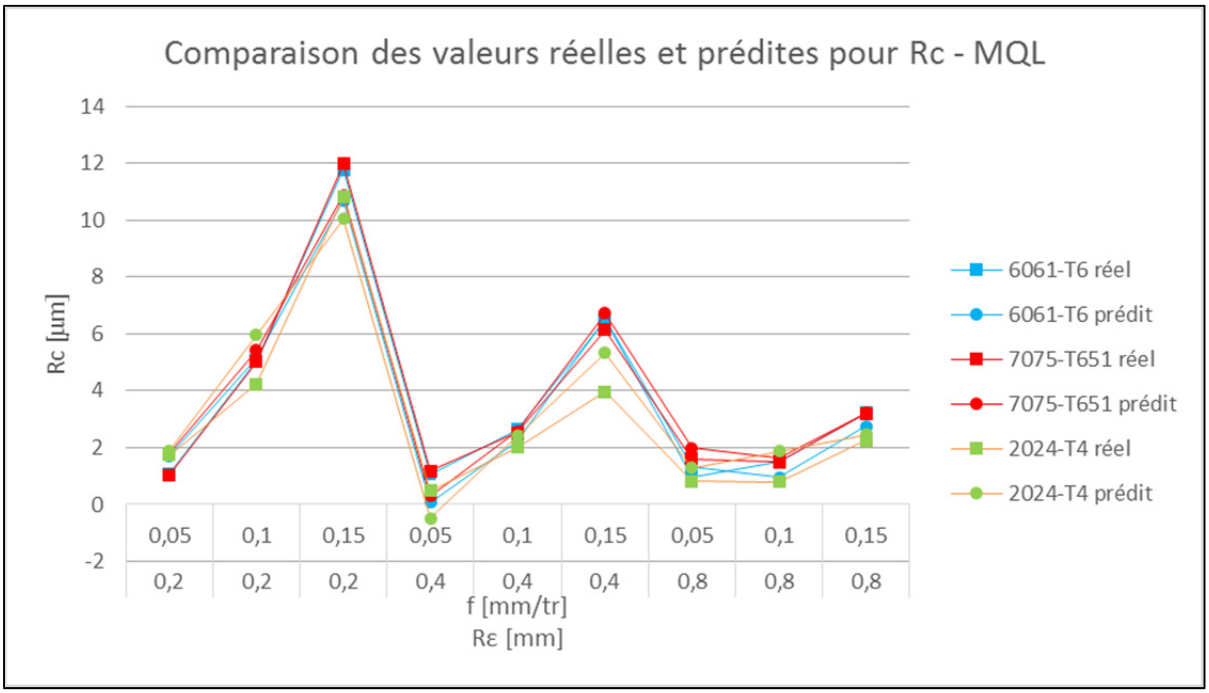

Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rq - L
Rq [µm]
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
-0,5
0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15
0,2 0,2 0,2 0,4 0,4 0,4 0,8 0,8 0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit

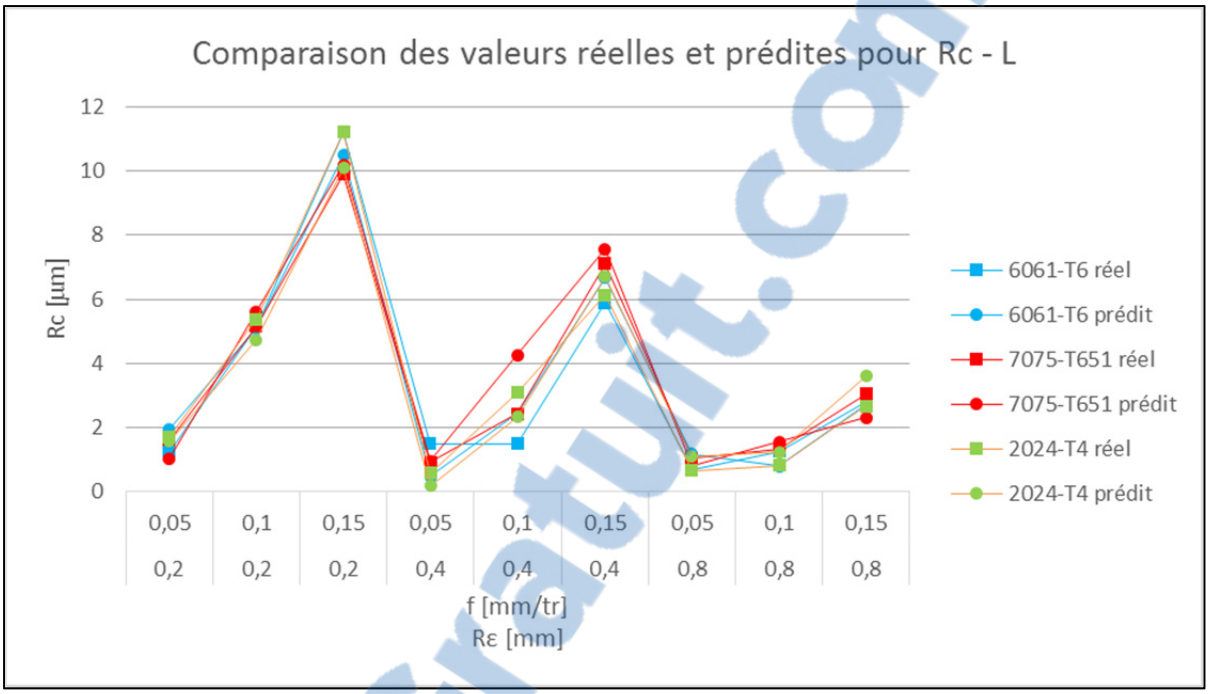

Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rv - S
Rv [µm]
6
5
4
3
2
1
0
0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15
0,2 0,2 0,2 0,4 0,4 0,4 0,8 0,8 0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit


Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rv - MQL
Rv [µm]
0
1
2
3
4
5
6
0,05
0,1
0,15
0,05
0,1
0,15
0,05
0,1
0,15
0,2
0,2
0,2
0,4
0,4
0,4
0,8
0,8
0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit


Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rv - L
Rv [µm]
0
1
2
3
4
5
6
0,05
0,1
0,15
0,05
0,1
0,15
0,05
0,1
0,15
0,2
0,2
0,2
0,4
0,4
0,4
0,8
0,8
0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit


Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rc - S
Rc [µm]
14
12
10
8
6
4
2
0
0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15
0,2 0,2 0,2 0,4 0,4 0,4 0,8 0,8 0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit


Comparaison des valeurs réelles et prédites pour Rc - MQL
Rc [µm]
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15 0,05 0,1 0,15
0,2 0,2 0,2 0,4 0,4 0,4 0,8 0,8 0,8
f [mm/tr]
Rε [mm]
6061-T6 réel
6061-T6 prédit
7075-T651 réel
7075-T651 prédit
2024-T4 réel
2024-T4 prédit



Rapport-Gratuit.com

ANNEXE XII

MATRICE DES RÉPONSES POUR LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Matériau	Mode de lubrification	R_ε (mm)	f (mm/tr)	σs (MPa)
2024-T4	S	0,2	0,05	-204,526
2024-T4	S	0,2	0,1	-120,593
2024-T4	S	0,2	0,15	-17,636
2024-T4	S	0,4	0,05	-107,51
2024-T4	S	0,4	0,1	-65,486
2024-T4	S	0,4	0,15	27,932
2024-T4	S	0,8	0,05	194,98
2024-T4	S	0,8	0,1	178,011
2024-T4	S	0,8	0,15	96,188
2024-T4	MQL	0,2	0,05	59,946
2024-T4	MQL	0,2	0,1	111,026
2024-T4	MQL	0,2	0,15	40,162
2024-T4	MQL	0,4	0,05	-154,253
2024-T4	MQL	0,4	0,1	-57,038
2024-T4	MQL	0,4	0,15	-105,944
2024-T4	MQL	0,8	0,05	-205,615
2024-T4	MQL	0,8	0,1	-100,138
2024-T4	MQL	0,8	0,15	218,859
2024-T4	L	0,2	0,05	-147,726
2024-T4	L	0,2	0,1	-168,755
2024-T4	L	0,2	0,15	-49,213
2024-T4	L	0,4	0,05	-34,443
2024-T4	L	0,4	0,1	37,992
2024-T4	L	0,4	0,15	61,091
2024-T4	L	0,8	0,05	-37,129
2024-T4	L	0,8	0,1	276,343
2024-T4	L	0,8	0,15	272,708
6061-T6	S	0,2	0,05	-62,82
6061-T6	S	0,2	0,1	39,605
6061-T6	S	0,2	0,15	-14,322
6061-T6	S	0,4	0,05	-137,168
6061-T6	S	0,4	0,1	-104,704
6061-T6	S	0,4	0,15	27,965
6061-T6	S	0,8	0,05	-84,634

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Matériau	Mode de lubrification	Rε (mm)	f (mm/tr)	σs (MPa)
6061-T6	S	0,8	0,1	191,474
6061-T6	S	0,8	0,15	222,293
6061-T6	MQL	0,2	0,05	2,373
6061-T6	MQL	0,2	0,1	-36,387
6061-T6	MQL	0,2	0,15	-8,204
6061-T6	MQL	0,4	0,05	-111,749
6061-T6	MQL	0,4	0,1	-38,104
6061-T6	MQL	0,4	0,15	59,531
6061-T6	MQL	0,8	0,05	-144,887
6061-T6	MQL	0,8	0,1	-32,846
6061-T6	MQL	0,8	0,15	142,244
6061-T6	L	0,2	0,05	-2,533
6061-T6	L	0,2	0,1	4,48
6061-T6	L	0,2	0,15	41,94
6061-T6	L	0,4	0,05	-86,401
6061-T6	L	0,4	0,1	-36,471
6061-T6	L	0,4	0,15	-11,724
6061-T6	L	0,8	0,05	47,842
6061-T6	L	0,8	0,1	-90,553
6061-T6	L	0,8	0,15	65,514

ANNEXE XIII

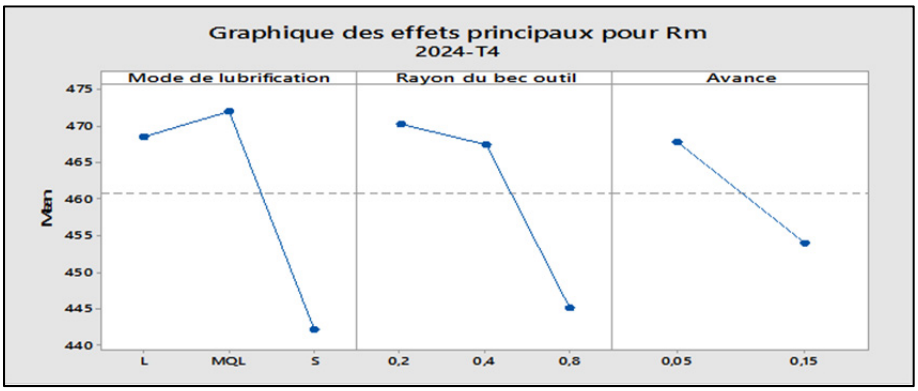
MATRICE DES RÉPONSES POUR LE TEST DE TRACTION

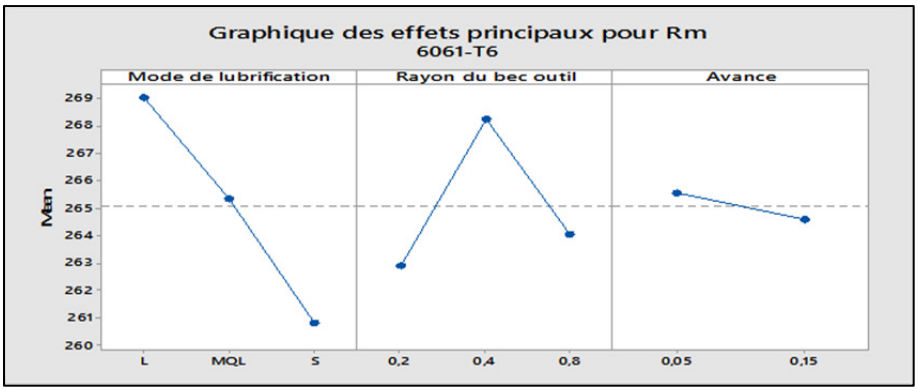
Essai	Matériau	Mode de lubrification	Rε(mm)	f(mm/tr)	Re(MPa)	UTS(MPa)	Rm(MPa)
1	2024-T4	S	0,2	0,05	324,2648	493,5407	465,0205
2	2024-T4	S	0,2	0,15	325,5355	494,73	472,5973
3	2024-T4	S	0,4	0,05	327,219	494,9161	459,4814
4	2024-T4	S	0,4	0,15	322,7439	491,0978	463,2258
5	2024-T4	S	0,8	0,05	321,2781	492,4685	469,3429
6	2024-T4	S	0,8	0,15	323,4637	493,2688	488,9378
7	2024-T4	MQL	0,2	0,05	317,7852	491,3459	473,5558
8	2024-T4	MQL	0,2	0,15	330,8379	500,3228	471,4132
9	2024-T4	MQL	0,4	0,05	328,4054	499,1535	471,6426
10	2024-T4	MQL	0,4	0,15	328,3115	497,01	472,3916
11	2024-T4	MQL	0,8	0,05	322,3508	492,8976	474,8142
12	2024-T4	MQL	0,8	0,15	328,0916	500,273	468,1056
13	2024-T4	L	0,2	0,05	328,4362	496,766	465,6942
14	2024-T4	L	0,2	0,15	331,8496	504,3755	472,9398
15	2024-T4	L	0,4	0,05	321,4341	490,0544	470,7334
16	2024-T4	L	0,4	0,15	324,0556	492,1558	466,8355
17	2024-T4	L	0,8	0,05	322,6803	495,0518	459,8708
18	2024-T4	L	0,8	0,15	324,581	494,608	475,2573
19	6061T6	S	0,2	0,05	281,2933	323,6325	241,156
20	6061T6	S	0,2	0,15	271,7	319,7924	258,607
21	6061T6	S	0,4	0,05	260,261	312,445	261,55
22	6061T6	S	0,4	0,15	265,915	314,7828	277,5021
23	6061T6	S	0,8	0,05	266,84	315,4675	253,9311
24	6061T6	S	0,8	0,15	267,8369	317,0191	272,3657
25	6061T6	MQL	0,2	0,05	264,0311	318,2729	273,6182
26	6061T6	MQL	0,2	0,15	276,06	324,4997	245,227
27	6061T6	MQL	0,4	0,05	281,0082	324,0954	278,1999
28	6061T6	MQL	0,4	0,15	280,038	320,9851	255,5855
29	6061T6	MQL	0,8	0,05	268,47	316,7131	269,5147
30	6061T6	MQL	0,8	0,15	279,0596	322,7347	269,968
31	6061T6	L	0,2	0,05	260,7844	316,7084	271,338
32	6061T6	L	0,2	0,15	287,0929	329,5918	287,7284

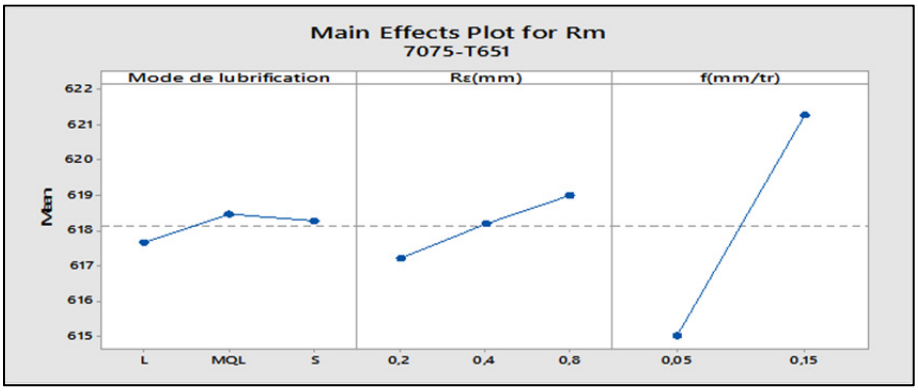
Essai	Matériau	Mode de lubrification	Rε(mm)	f(mm/tr)	Re(MPa)	UTS(MPa)	Rm(MPa)
33	6061T6	L	0,4	0,05	270,2771	319,0719	274,0059
34	6061T6	L	0,4	0,15	274,1489	317,9453	262,6702
35	6061T6	L	0,8	0,05	271,7486	318,8563	266,866
36	6061T6	L	0,8	0,15	274,7763	323,628	251,8154
37	7075-T651	S	0,2	0,05	641,8617	681,2536	605,5549
38	7075-T651	S	0,2	0,15	621,4326	662,898	629,2542
39	7075-T651	S	0,4	0,05	640,5449	681,3194	610,0051
40	7075-T651	S	0,4	0,15	607,6714	651,8788	618,7174
41	7075-T651	S	0,8	0,05	648,4607	691,2775	624,0918
42	7075-T651	S	0,8	0,15	640,4935	683,097	622,0209
43	7075-T651	MQL	0,2	0,05	615,49	659,3893	610,063
44	7075-T651	MQL	0,2	0,15	622,665	664,68	622,8681
45	7075-T651	MQL	0,4	0,05	657,71	698,8518	641,7282
46	7075-T651	MQL	0,4	0,15	608,5236	653,8869	595,5924
47	7075-T651	MQL	0,8	0,05	650,4439	692,1579	624,2978
48	7075-T651	MQL	0,8	0,15	635,4496	677,8057	616,2412
49	7075-T651	L	0,2	0,05	640,05	681,5	614,56
50	7075-T651	L	0,2	0,15	617,822	660,845	621,082
51	7075-T651	L	0,4	0,05	645,7312	687,8608	614,7968
52	7075-T651	L	0,4	0,15	633,7975	673,9129	628,229
53	7075-T651	L	0,8	0,05	625,4145	668,426	589,9889
54	7075-T651	L	0,8	0,15	649,3886	693,0378	637,3306

ANNEXE XIV

EFFETS PRINCIPAUX ET INTERACTIONS POUR Rm







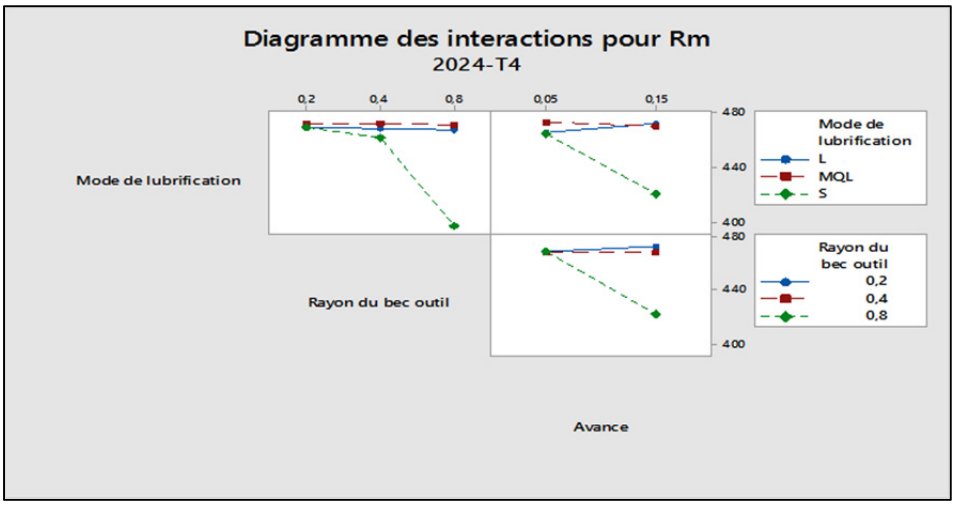


Diagramme des interactions pour Rm
2024-T4
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
480
440
400
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8

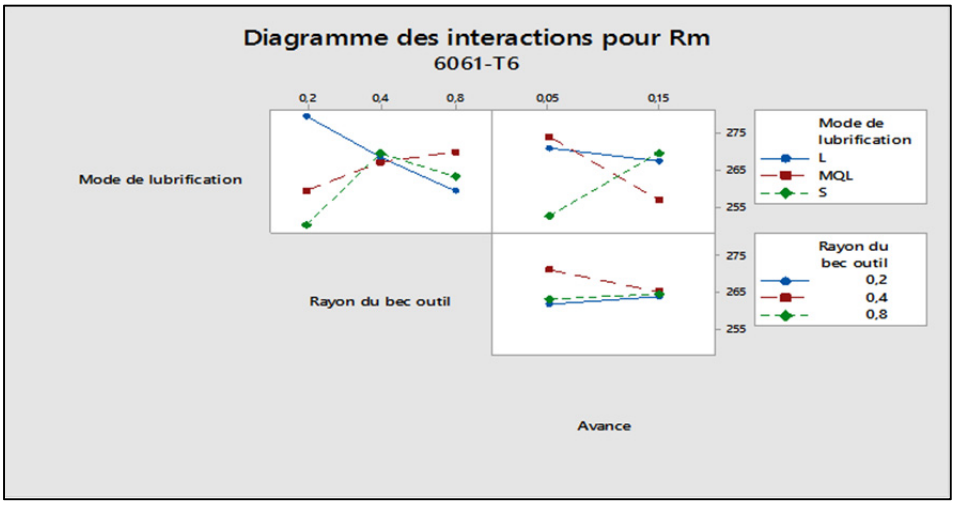


Diagramme des interactions pour Rm
6061-T6
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
275
265
255
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8

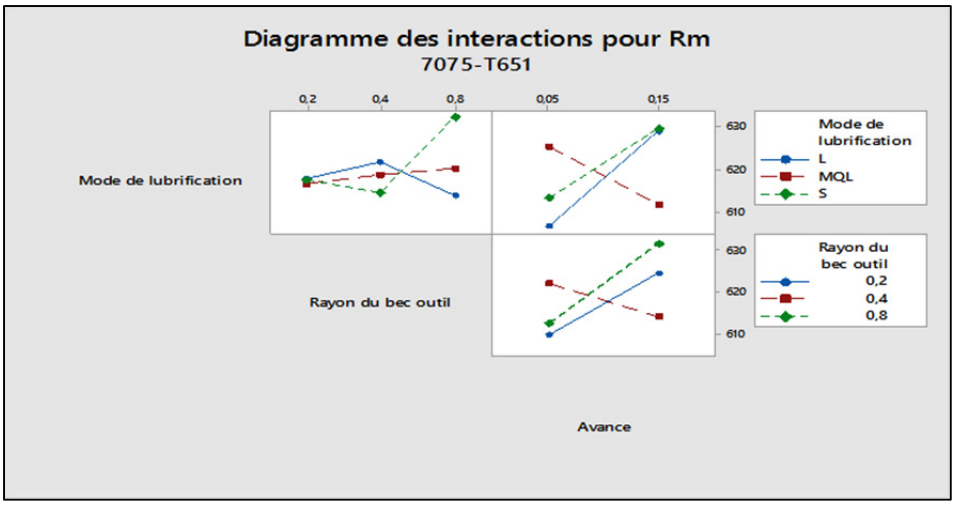
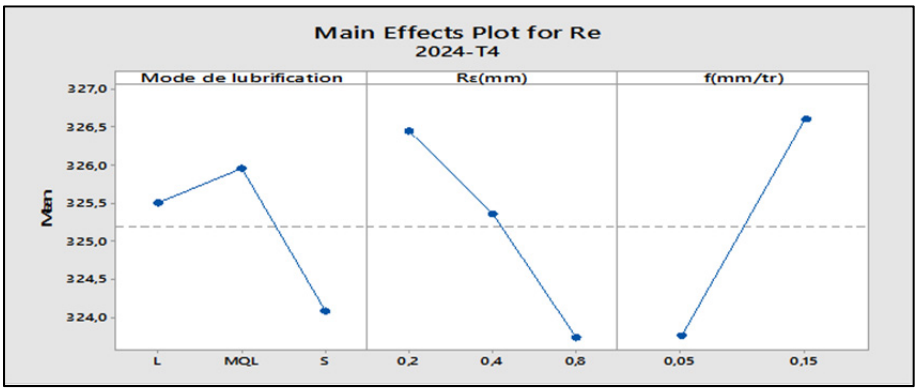
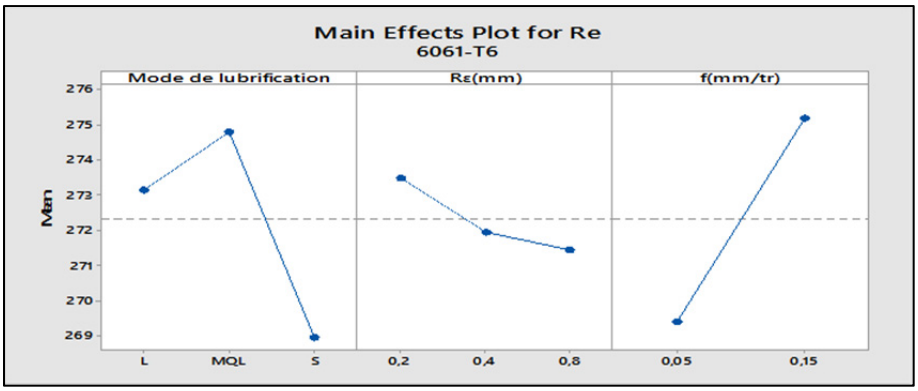


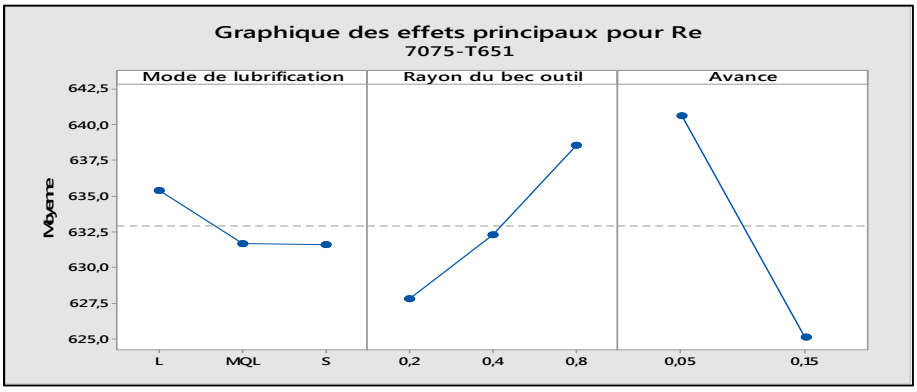
Diagramme des interactions pour Rm
7075-T651
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
630
620
610
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8

ANNEXE XV

EFFETS PRINCIPAUX ET INTERACTIONS POUR Re







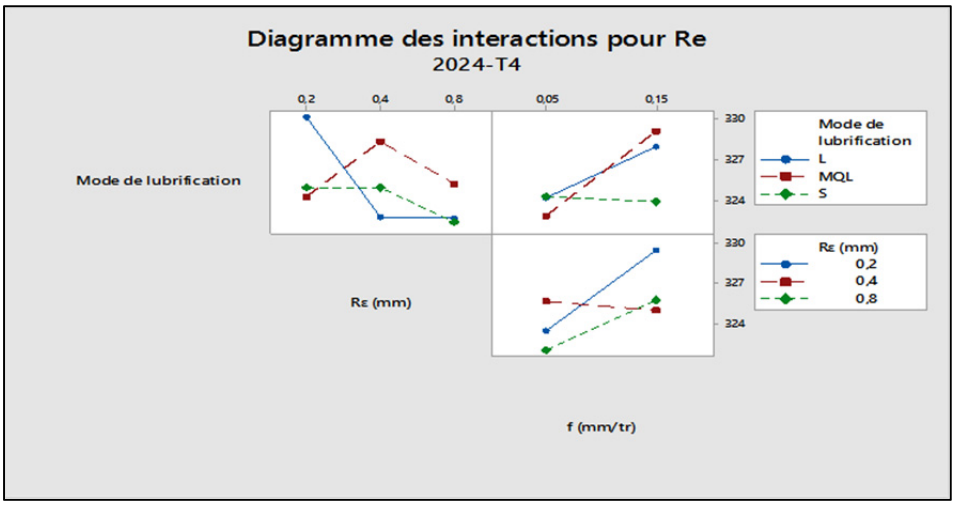


Diagramme des interactions pour Re
2024-T4
Mode de lubrification
Rε (mm)
f (mm/tr)
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
330
327
324
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rε (mm)
0,2
0,4
0,8

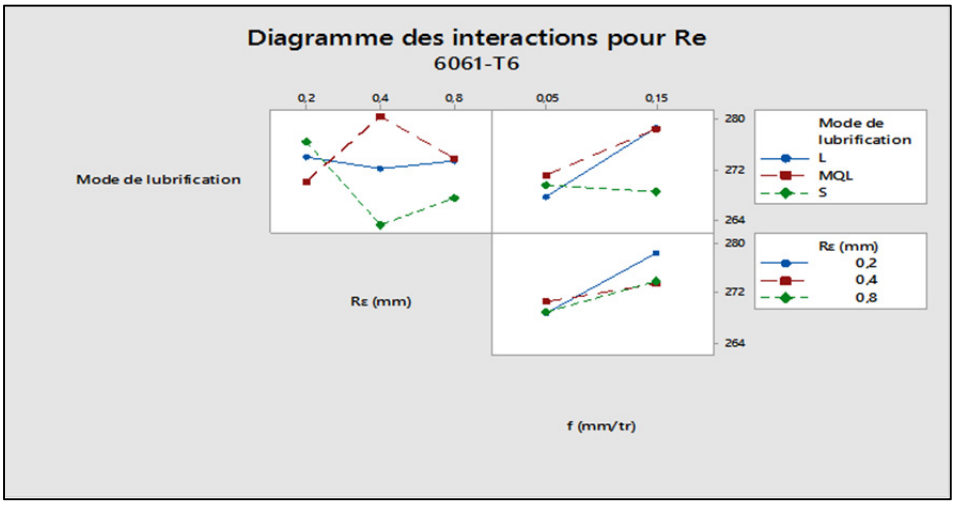


Diagramme des interactions pour Re
6061-T6
Mode de lubrification
Rε (mm)
f (mm/tr)
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
280
272
264
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rε (mm)
0,2
0,4
0,8

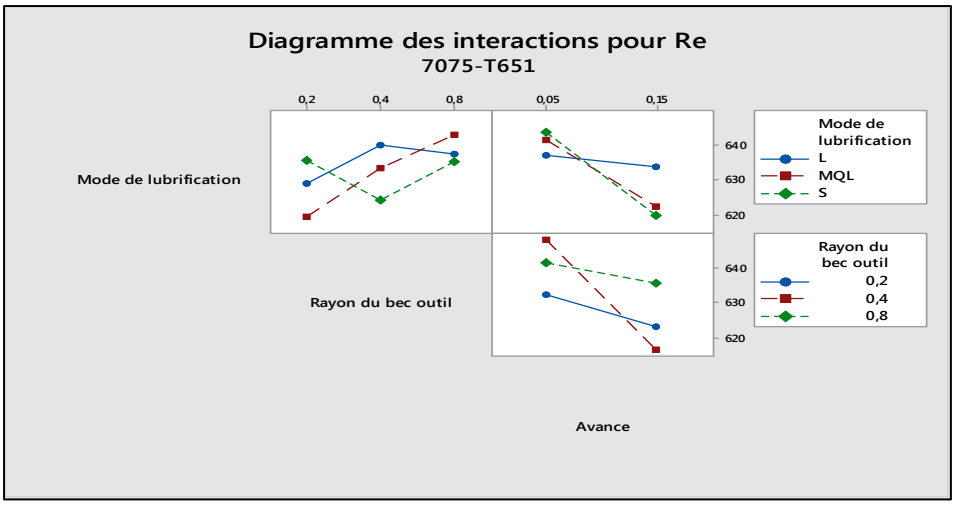
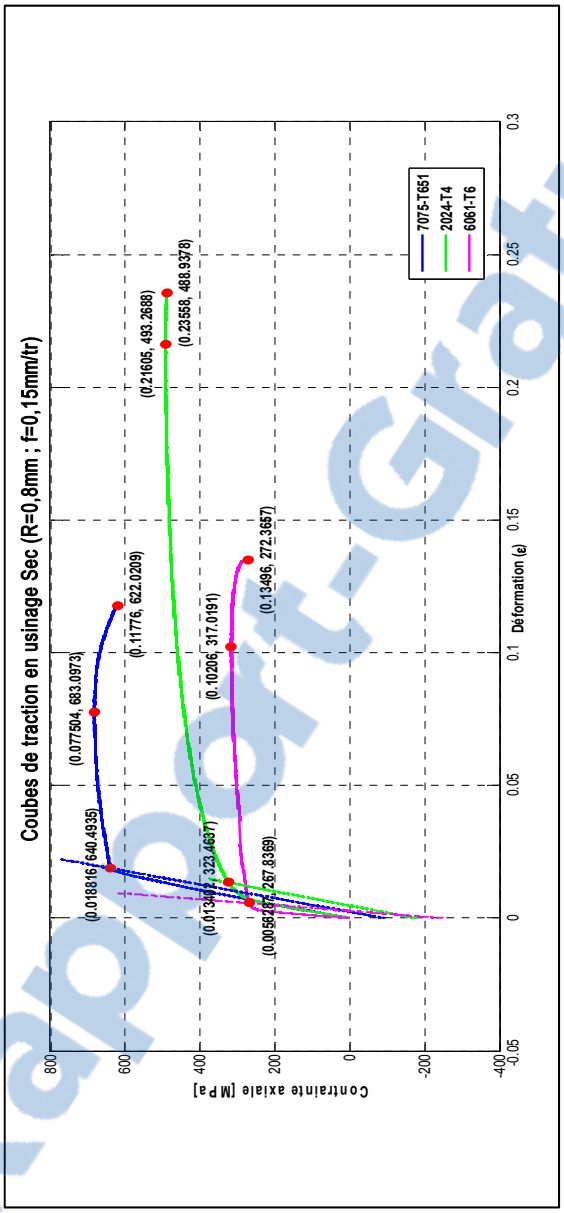
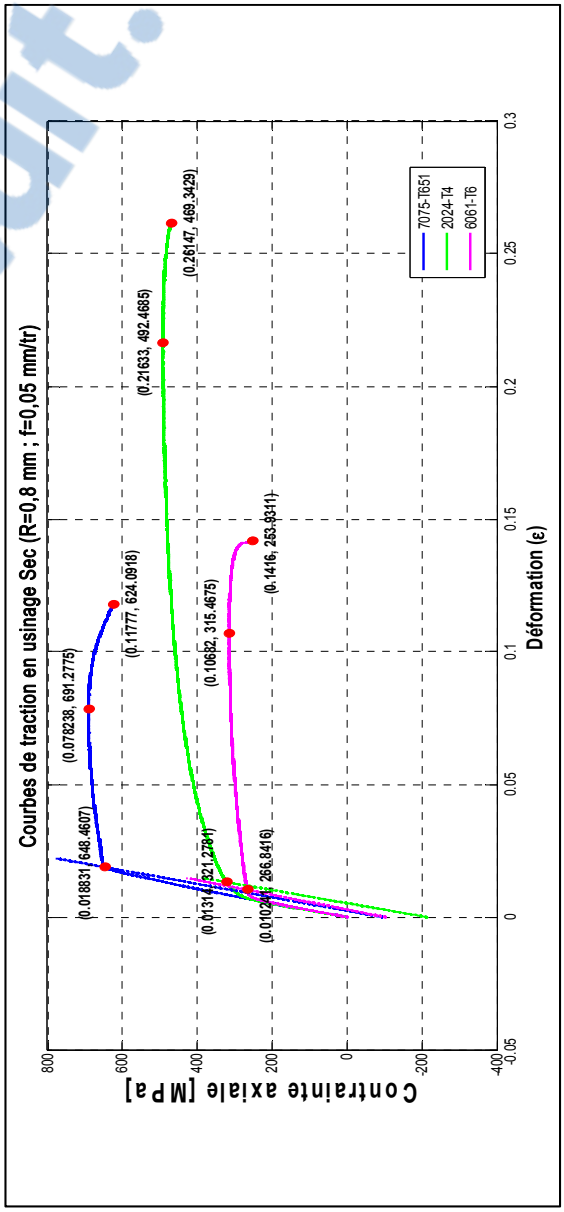


Diagramme des interactions pour Re
7075-T651
Mode de lubrification
Rayon du bec outil
Avance
0,2
0,4
0,8
0,05
0,15
640
630
620
Mode de lubrification
L
MQL
S
Rayon du bec outil
0,2
0,4
0,8

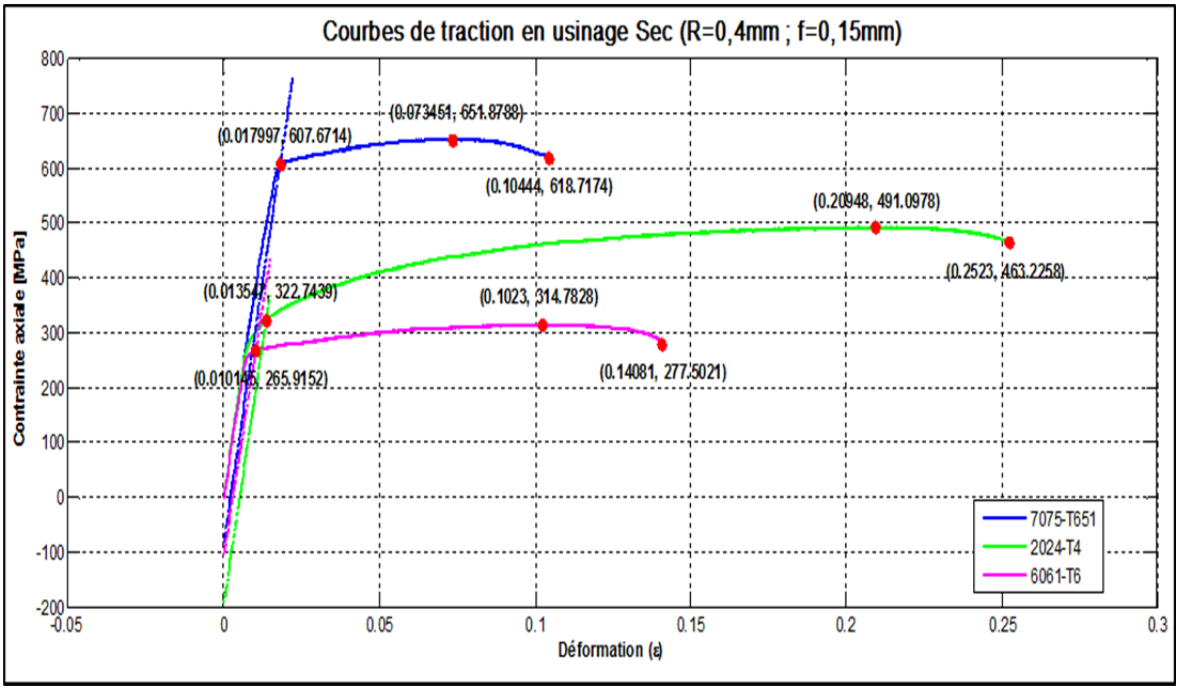
ANNEXE XVI

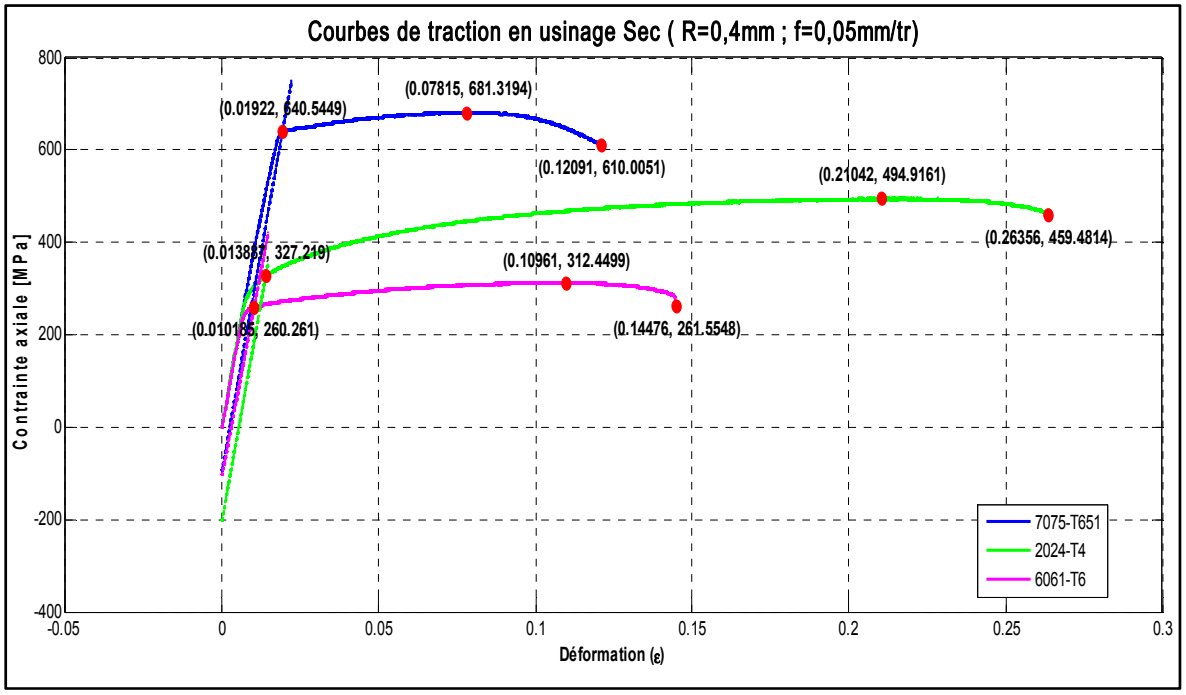
COURBES DE TRACTION

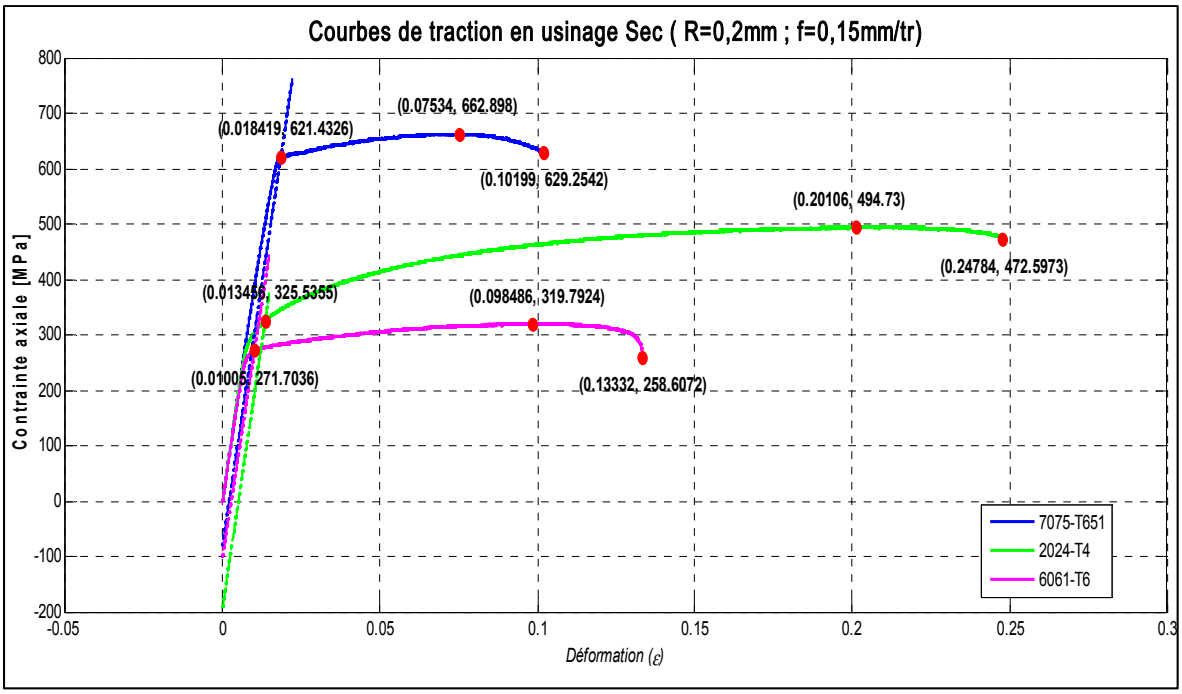


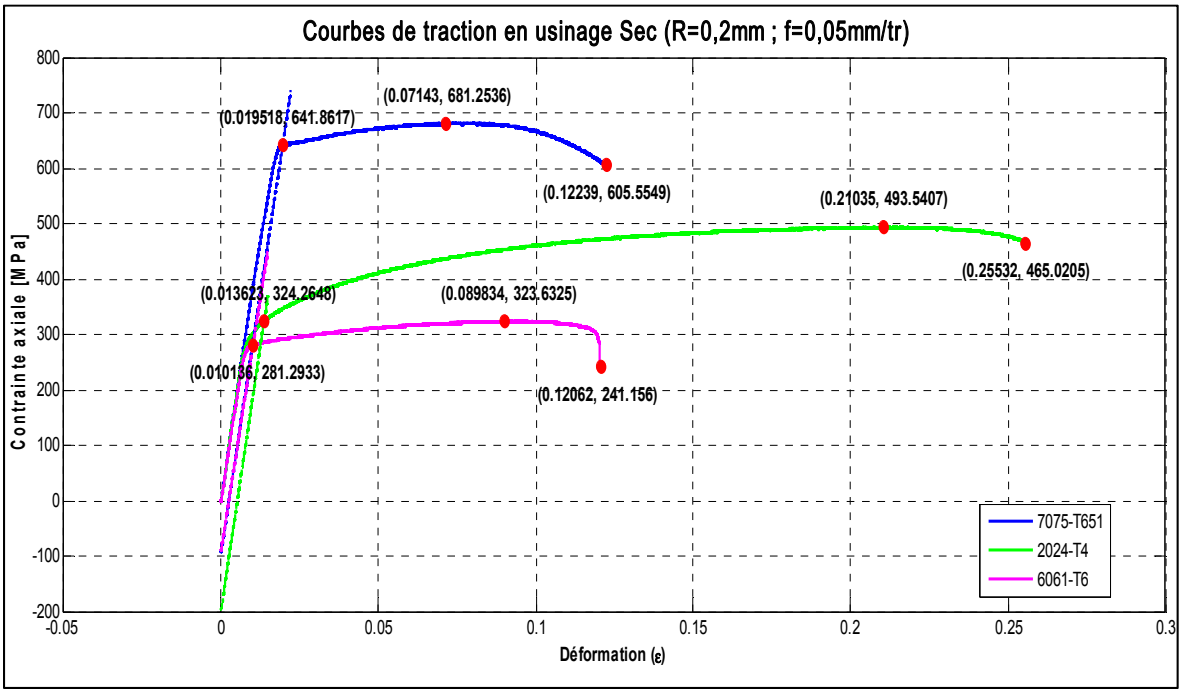


Rapport-Gratuit.com

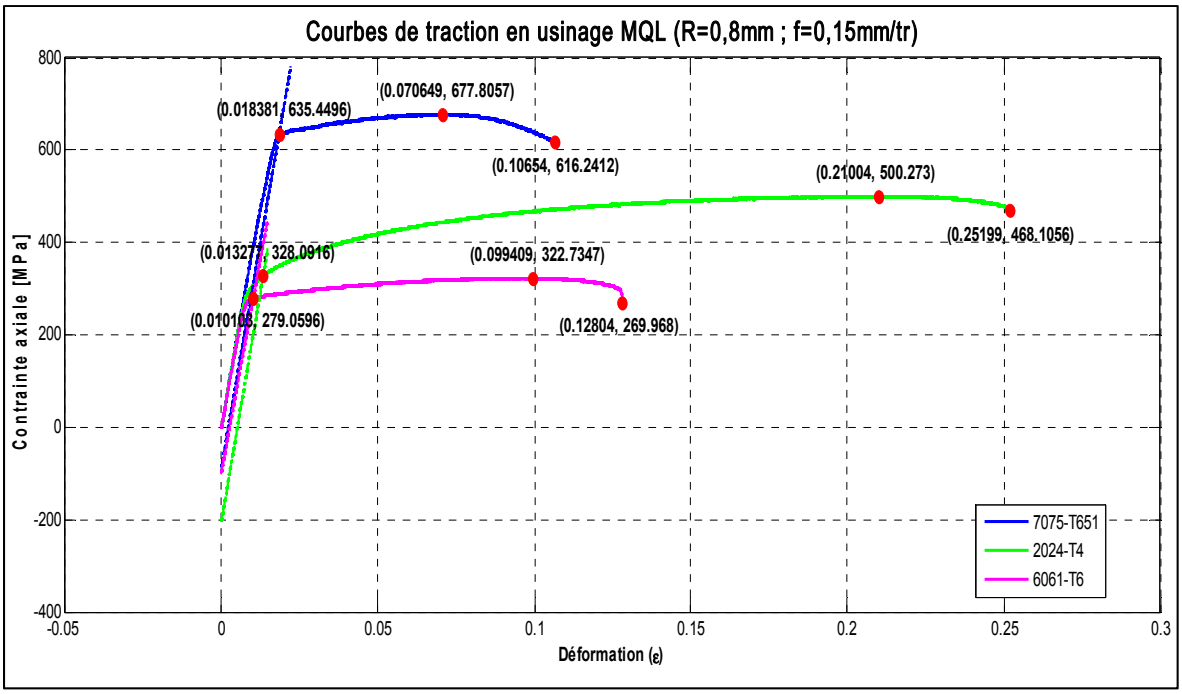

Courbes de traction en usinage Sec (R=0,4mm ; f=0,15mm)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.017997, 607.6714)
(0.073451, 651.8788)
(0.10444, 618.7174)
(0.20948, 491.0978)
(0.2523, 463.2258)
(0.013547, 322.7439)
(0.1023, 314.7828)
(0.010145, 265.9152)
(0.14081, 277.5021)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

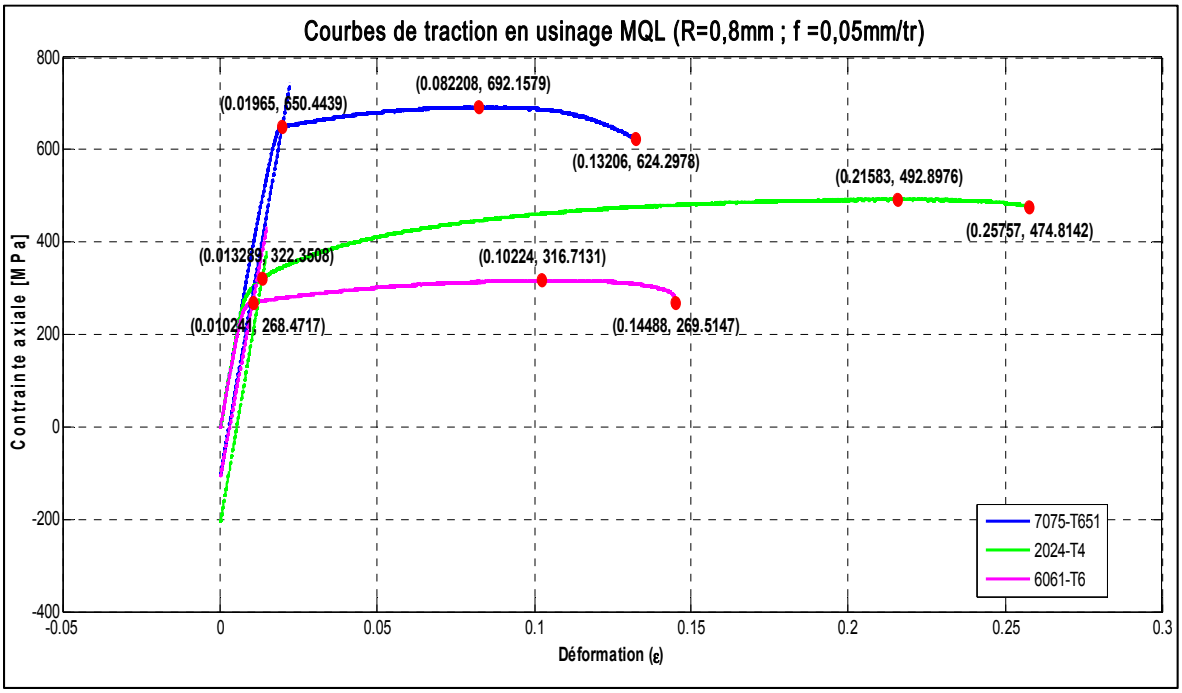

Courbes de traction en usinage Sec (R=0,4mm ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.01922, 640.5449)
(0.07815, 681.3194)
(0.12091, 610.0051)
(0.21042, 494.9161)
(0.26356, 459.4814)
(0.013837, 327.249)
(0.10961, 312.4499)
(0.010185, 260.261)
(0.14476, 261.5548)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

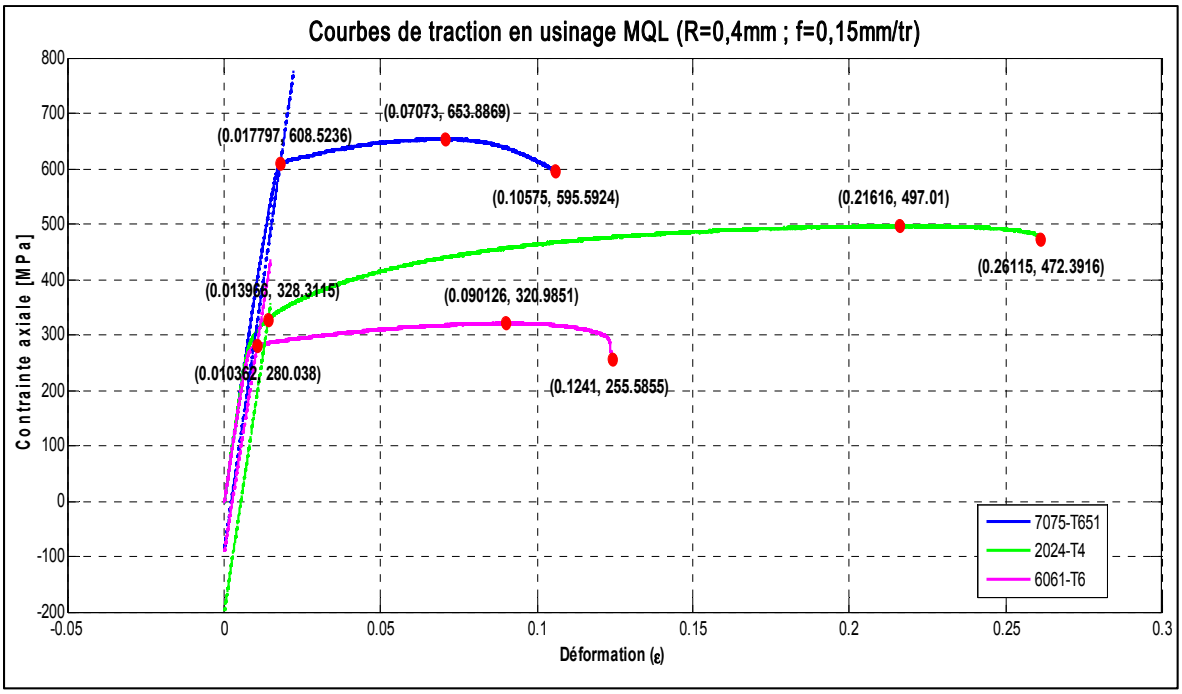


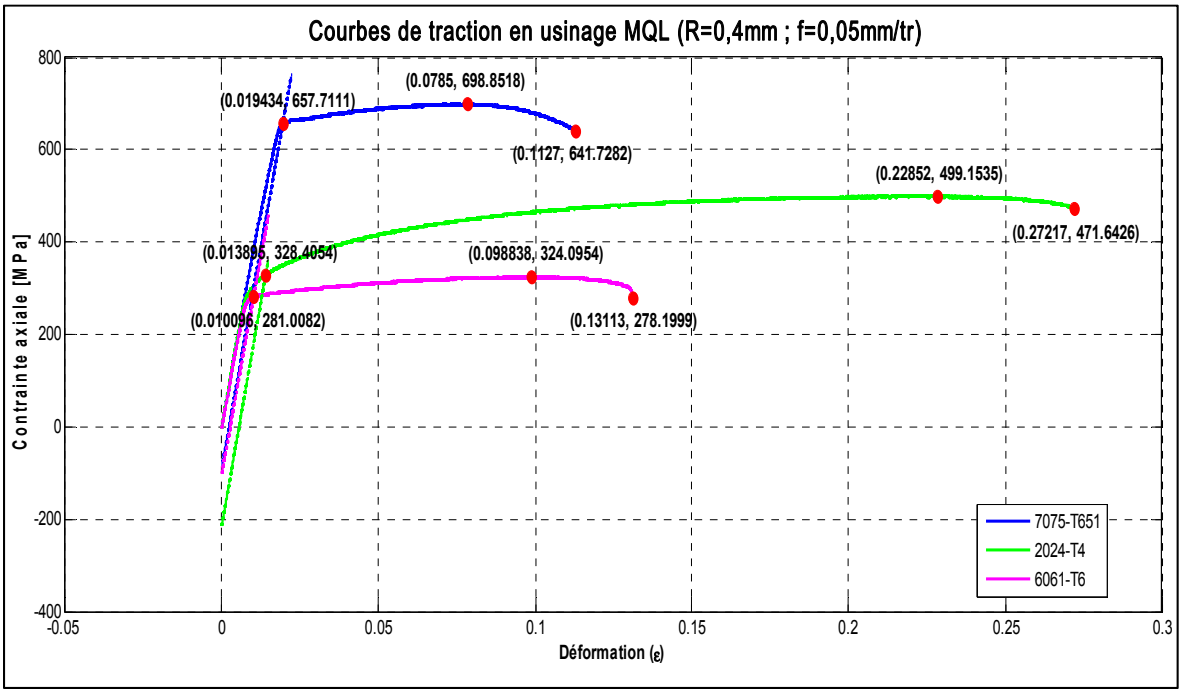


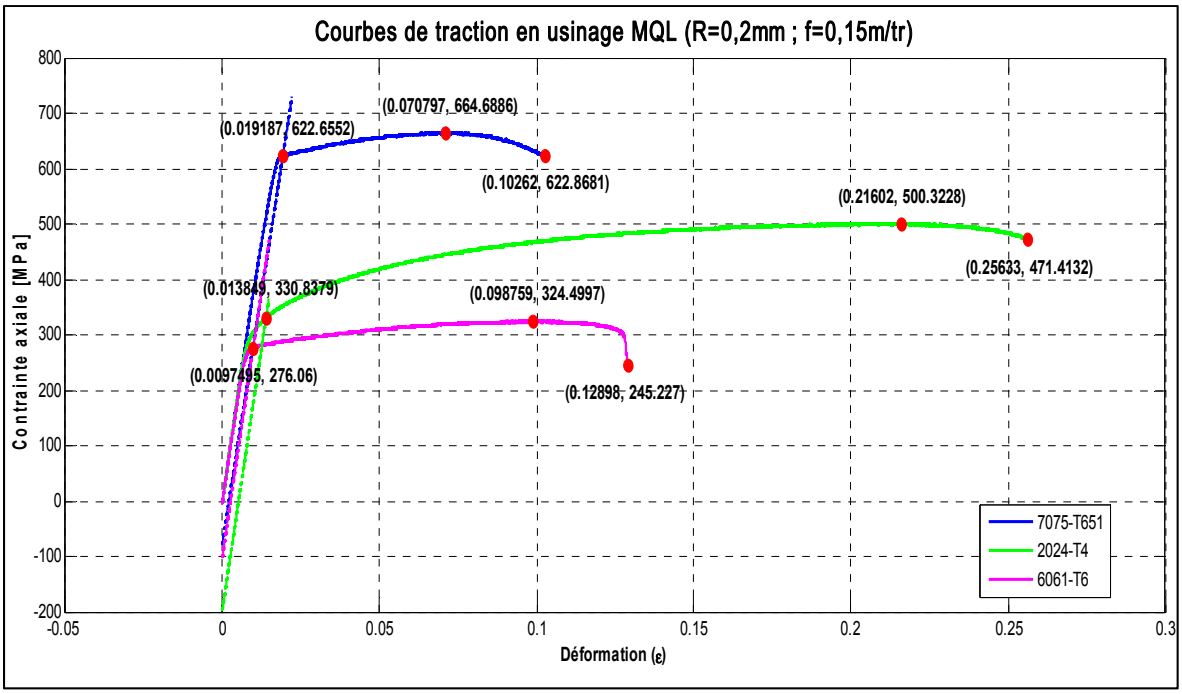
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

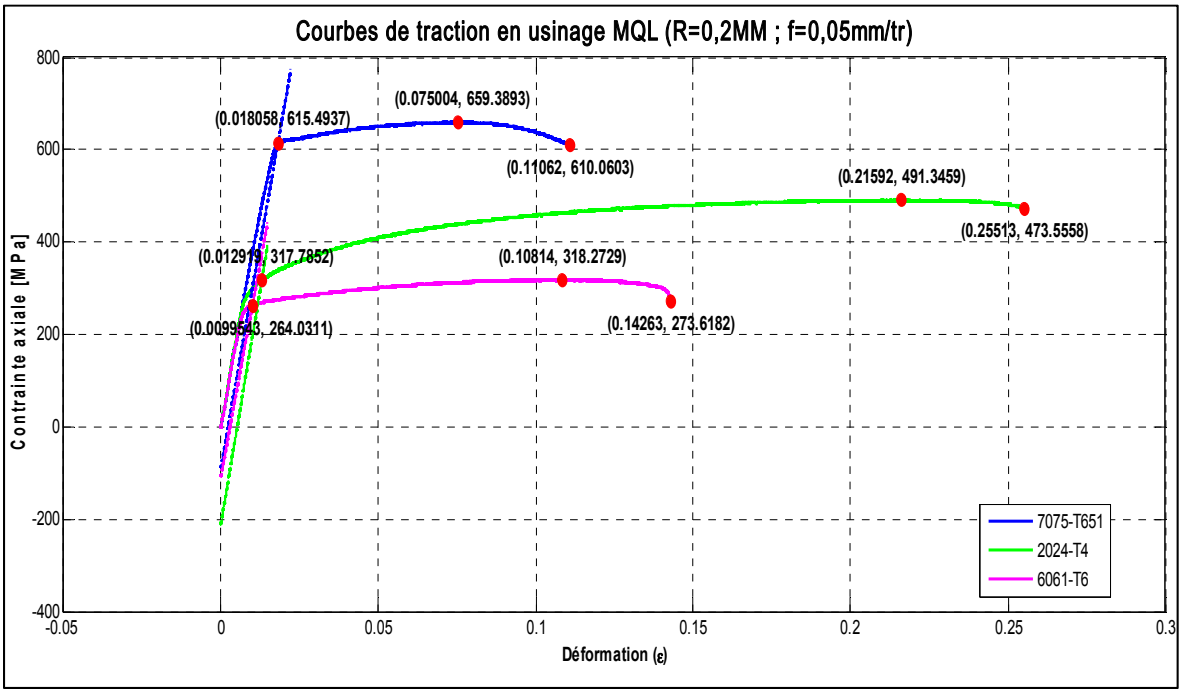

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,8mm ; f=0,15mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018381, 635.4496)
(0.070649, 677.8057)
(0.10654, 616.2412)
(0.21004, 500.273)
(0.25199, 468.1056)
(0.013277, 328.0916)
(0.099409, 322.7347)
(0.010108, 279.0596)
(0.12804, 269.968)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

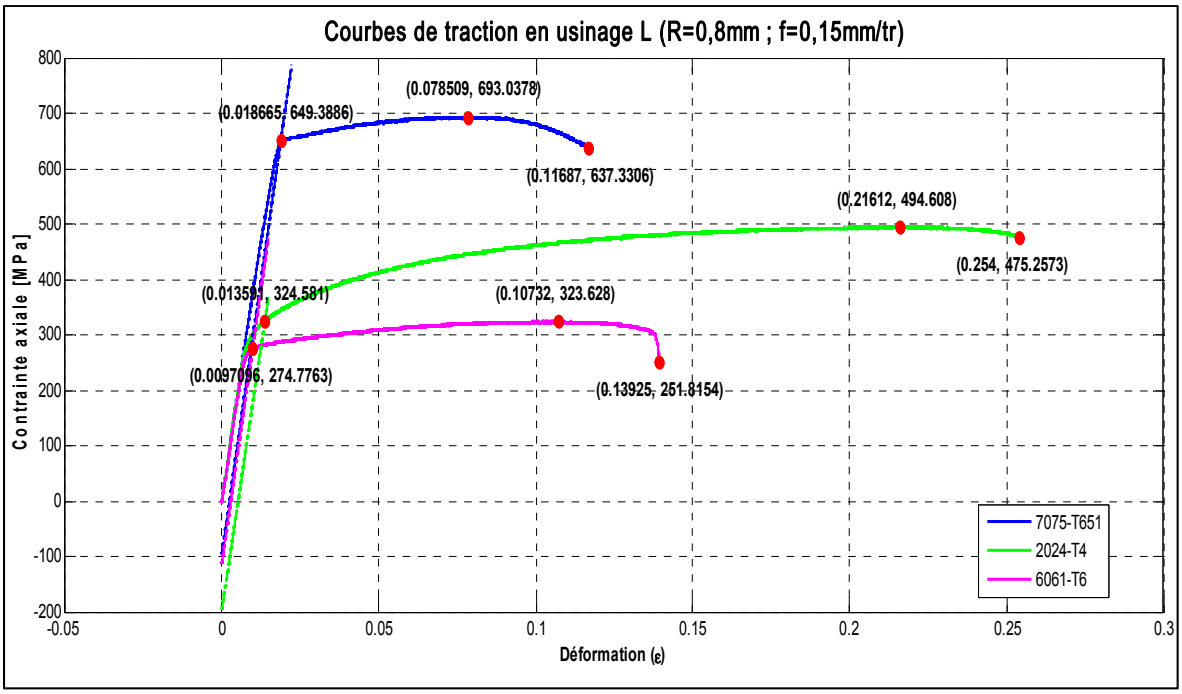

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,8mm ; f =0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.01965, 650.4439)
(0.082208, 692.1579)
(0.13206, 624.2978)
(0.21583, 492.8976)
(0.25757, 474.8142)
(0.013289, 322.3508)
(0.10224, 316.7131)
(0.010244, 268.4717)
(0.14488, 269.5147)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

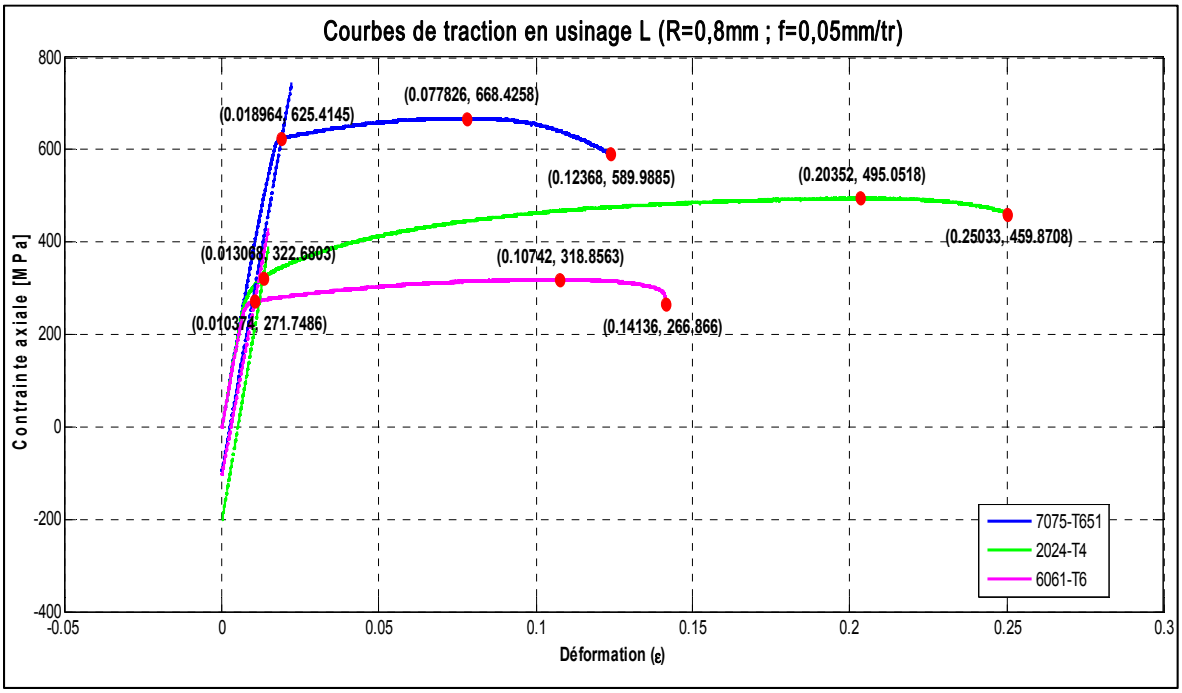

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,4mm ; f=0,15mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.017797, 608.5236)
(0.07073, 653.8869)
(0.10575, 595.5924)
(0.21616, 497.01)
(0.26115, 472.3916)
(0.013966, 328.3115)
(0.090126, 320.9851)
(0.010362, 280.038)
(0.1241, 255.5855)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

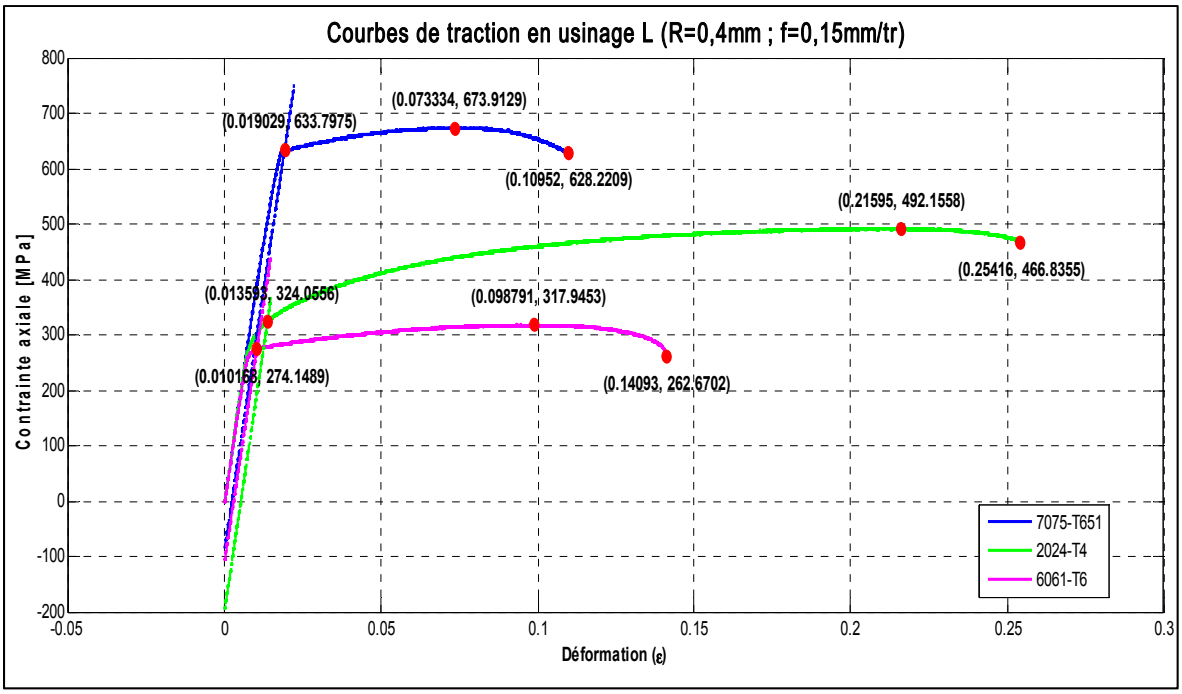

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,4mm ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.019434, 657.7111)
(0.0785, 698.8518)
(0.1127, 641.7282)
(0.22852, 499.1535)
(0.27217, 471.6426)
(0.013895, 328.4054)
(0.098838, 324.0954)
(0.010096, 281.0082)
(0.13113, 278.1999)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

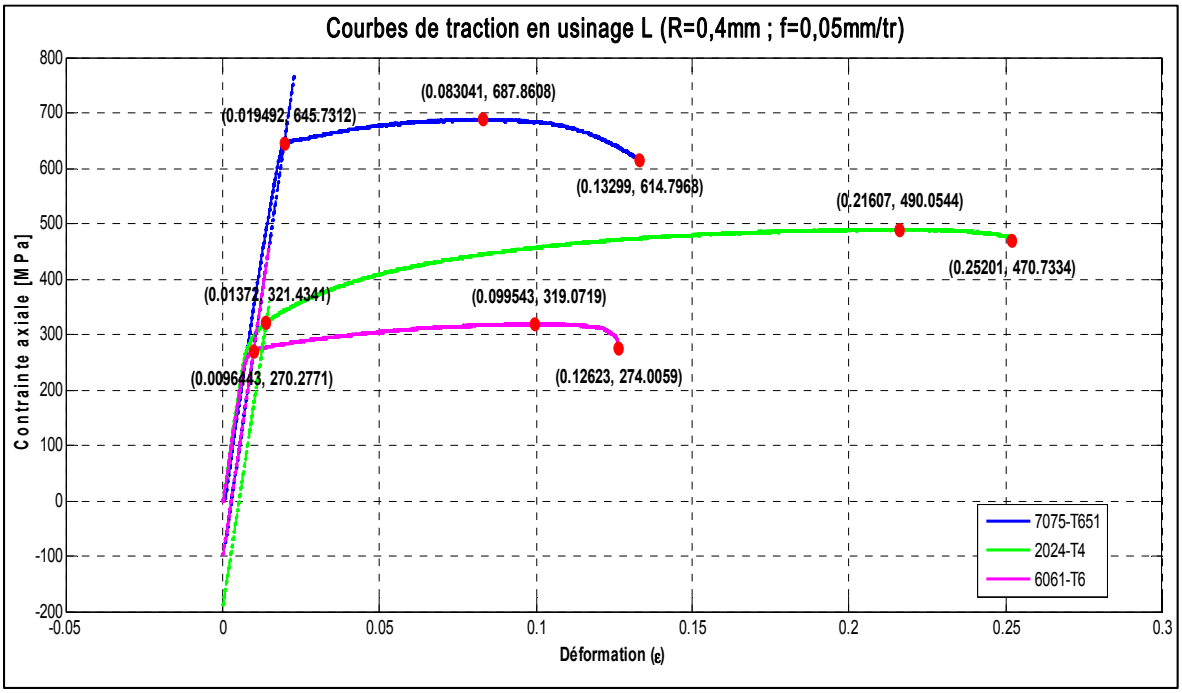

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,2mm ; f=0,15m/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.019187, 622.6552)
(0.070797, 664.6886)
(0.10262, 622.8681)
(0.21602, 500.3228)
(0.25633, 471.4132)
(0.013849, 330.8379)
(0.098759, 324.4997)
(0.0097495, 276.06)
(0.12898, 245.227)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

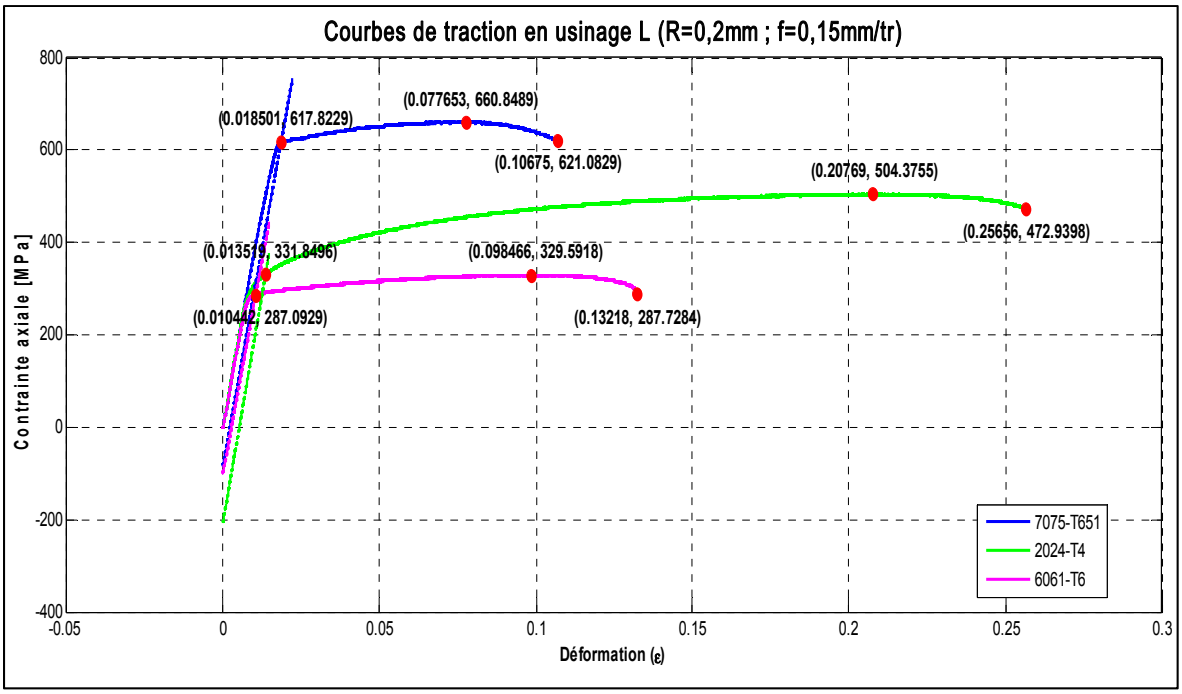

Courbes de traction en usinage MQL (R=0,2MM ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018058, 615.4937)
(0.075004, 659.3893)
(0.11062, 610.0603)
(0.21592, 491.3459)
(0.25513, 473.5558)
(0.012919, 317.7852)
(0.10814, 318.2729)
(0.0099543, 264.0311)
(0.14263, 273.6182)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

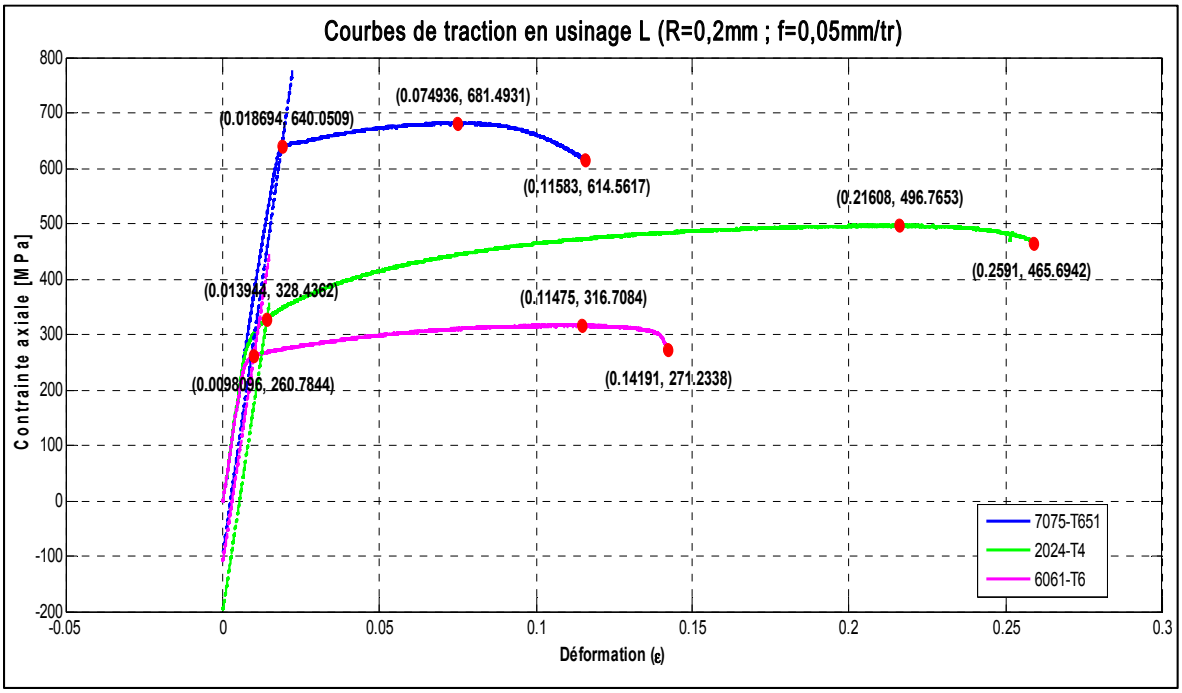

Courbes de traction en usinage L (R=0,8mm ; f=0,15mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018665, 649.3886)
(0.078509, 693.0378)
(0.11687, 637.3306)
(0.21612, 494.608)
(0.254, 475.2573)
(0.013591, 324.581)
(0.10732, 323.628)
(0.0097096, 274.7763)
(0.13925, 251.8154)
7075-T651
2024-T4
6061-T6


Courbes de traction en usinage L (R=0,8mm ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018964, 625.4145)
(0.077826, 668.4258)
(0.12368, 589.9885)
(0.20352, 495.0518)
(0.25033, 459.8708)
(0.013068, 322.6803)
(0.10742, 318.8563)
(0.010374, 271.7486)
(0.14136, 266.866)
7075-T651
2024-T4
6061-T6


Courbes de traction en usinage L (R=0,4mm ; f=0,15mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.019029, 633.7975)
(0.073334, 673.9129)
(0.10952, 628.2209)
(0.21595, 492.1558)
(0.25416, 466.8355)
(0.013593, 324.0556)
(0.098791, 317.9453)
(0.010168, 274.1489)
(0.14093, 262.6702)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

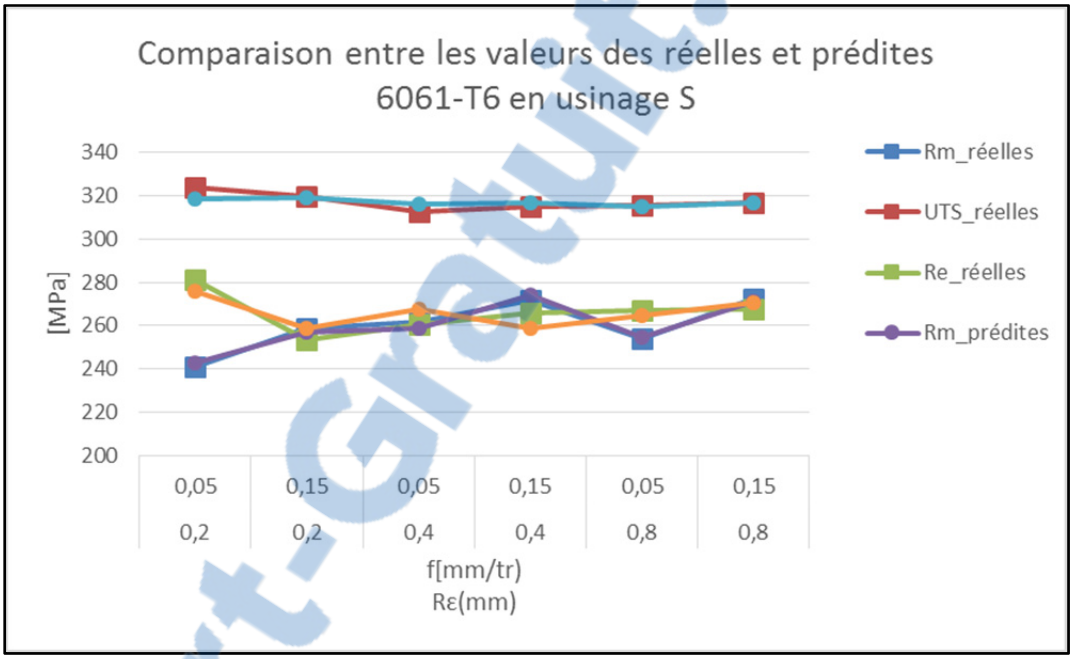

Courbes de traction en usinage L (R=0,4mm ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.019492, 645.7312)
(0.083041, 687.8608)
(0.13299, 614.7968)
(0.21607, 490.0544)
(0.25201, 470.7334)
(0.01372, 321.4341)
(0.099543, 319.0719)
(0.0096443, 270.2771)
(0.12623, 274.0059)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

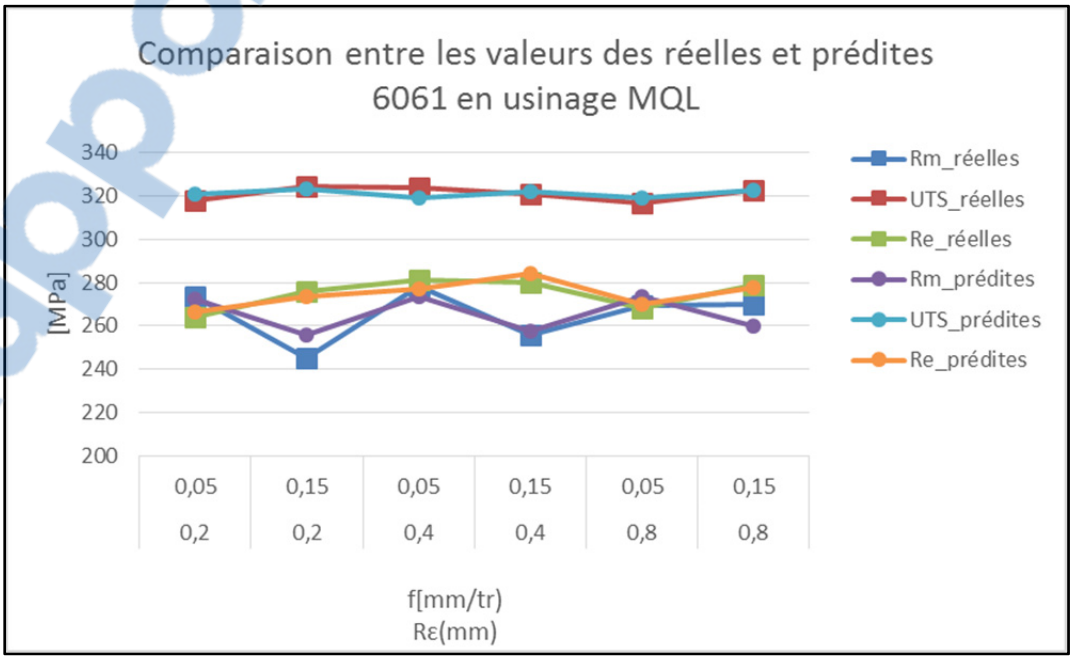

Courbes de traction en usinage L (R=0,2mm ; f=0,15mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018501, 617.8229)
(0.077653, 660.8489)
(0.10675, 621.0829)
(0.20769, 504.3755)
(0.25656, 472.9398)
(0.013519, 331.8496)
(0.098466, 329.5918)
(0.010442, 287.0929)
(0.13218, 287.7284)
7075-T651
2024-T4
6061-T6


Courbes de traction en usinage L (R=0,2mm ; f=0,05mm/tr)
Contrainte axiale [MPa]
Déformation (ε)
(0.018694, 640.0509)
(0.074936, 681.4931)
(0.11583, 614.5617)
(0.21608, 496.7653)
(0.2591, 465.6942)
(0.013944, 328.4362)
(0.11475, 316.7084)
(0.0098096, 260.7844)
(0.14191, 271.2338)
7075-T651
2024-T4
6061-T6

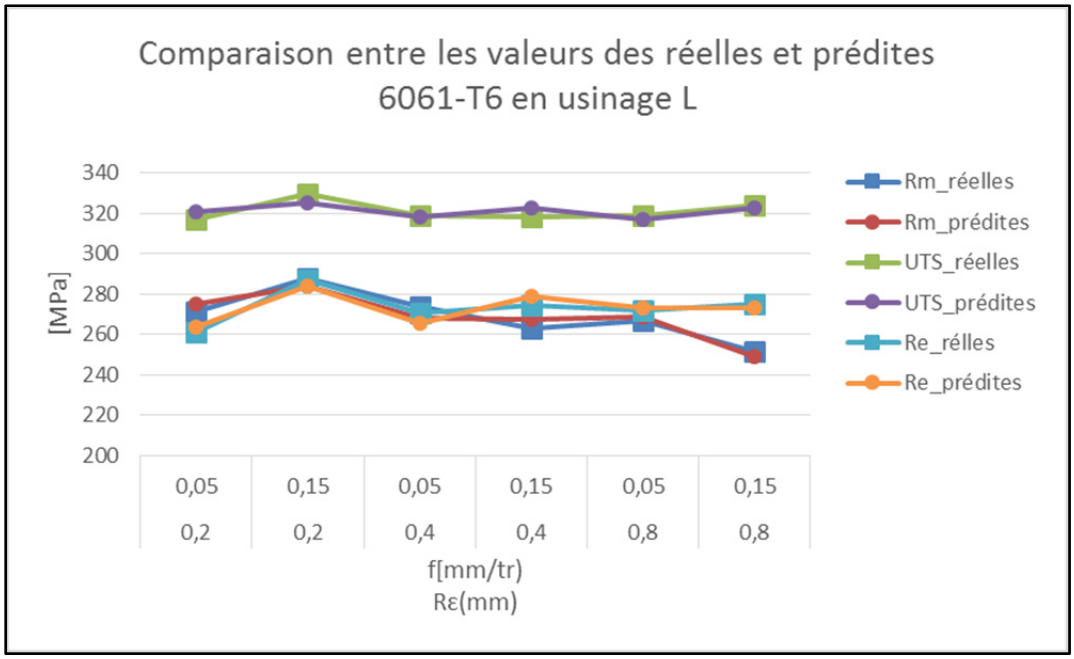
ANNEXE XVII

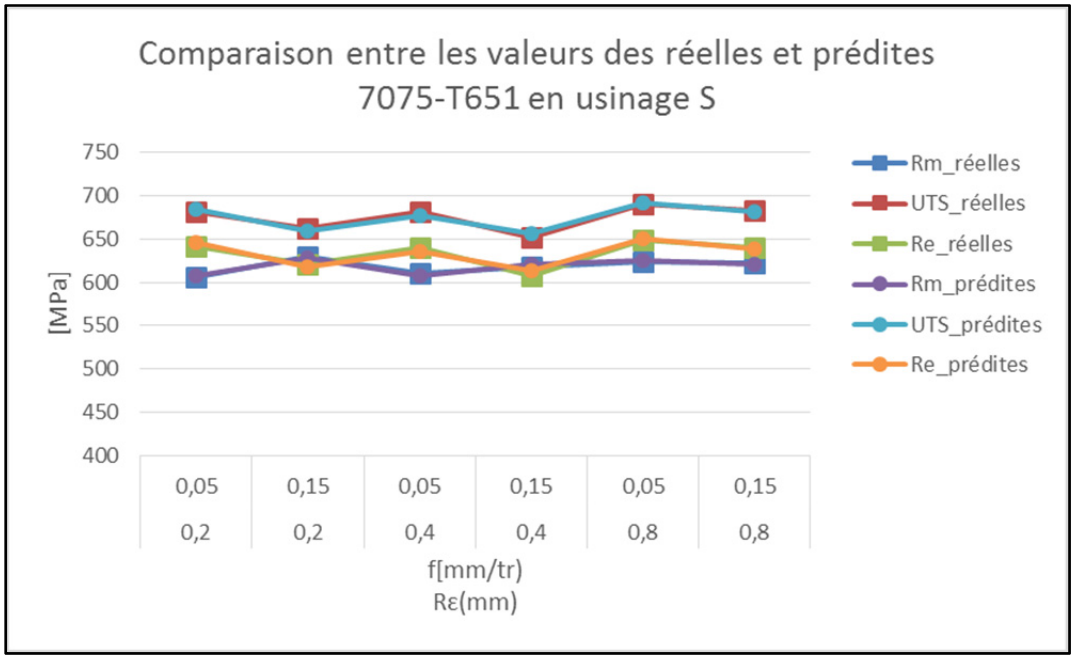
GRAPHIQUES COMPARATIFS ENTRE LES VALEURS RÉELLES ET PRÉDITES DES LIMITES ÉLASTIQUES, RÉSISTANCES À LA RACTION ET CONTRAINTES ULTIMES POUR LE 6061-T6 ET LE 7075-T651

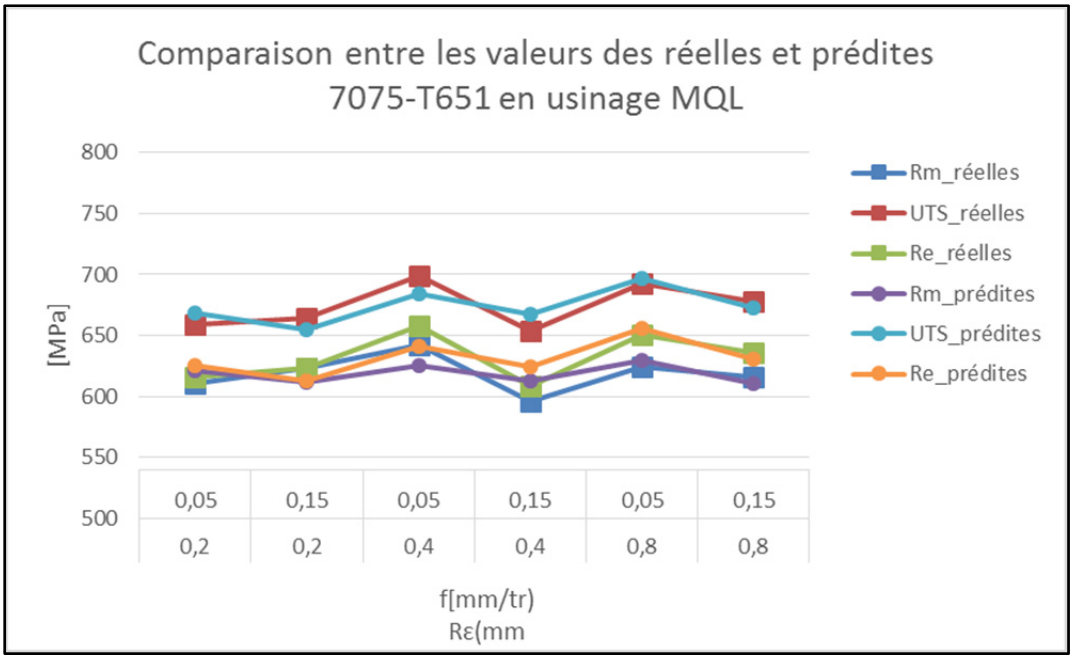


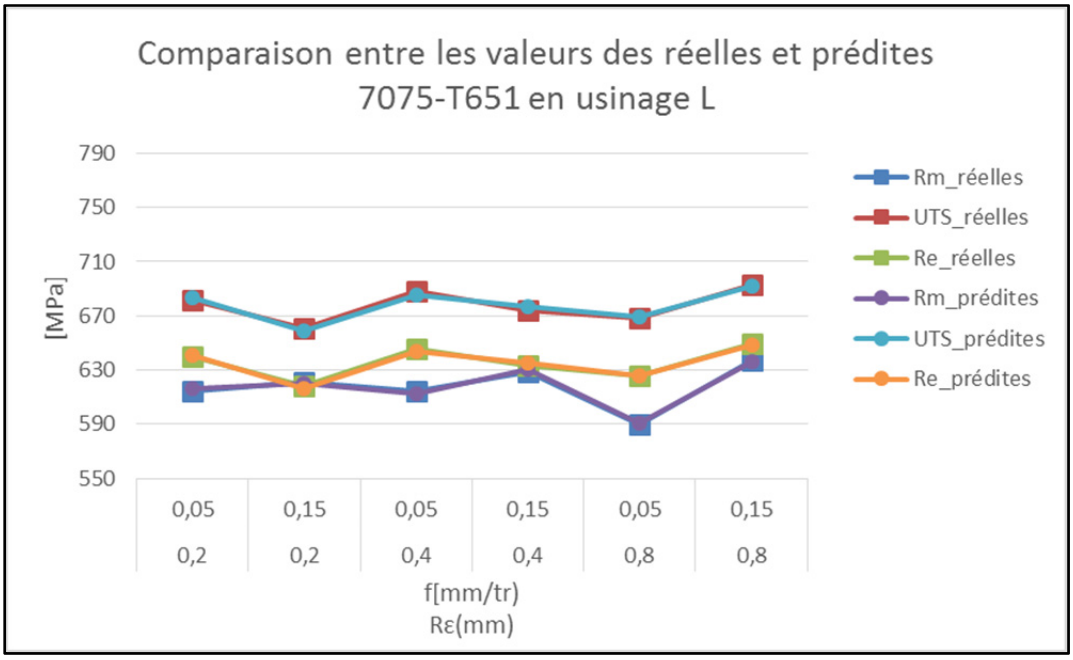


Rapport-Gratuit.com


Comparaison entre les valeurs des réelles et prédites
6061-T6 en usinage L
[MPa]
340
320
300
280
260
240
220
200
0,05
0,15
0,05
0,15
0,05
0,15
0,2
0,2
0,4
0,4
0,8
0,8
f[mm/tr)
Rε(mm)
Rm_réelles
Rm_prédites
UTS_réelles
UTS_prédites
Re_rélles
Re_prédites


Comparaison entre les valeurs des réelles et prédites
7075-T651 en usinage S
[MPa]
750
700
650
600
550
500
450
400
0,05
0,15
0,05
0,15
0,05
0,15
0,2
0,2
0,4
0,4
0,8
0,8
f[mm/tr)
Rε(mm)
Rm_réelles
UTS_réelles
Re_réelles
Rm_prédites
UTS_prédites
Re_prédites





Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Boothroyd, G. 1988. « Fundamentals of metal machining and machine tools » (Vol. 28). *CRC Press*.

Capello, Edoardo. 2005. « Residual stresses in turning: Part I: Influence of process parameters ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 160, n° 2, p. 221-228.

Capello, Edoardo. 2006. « Residual stresses in turning: Part II. Influence of the machined material ». *Journal of materials processing technology,* vol. 172, n° 3, p. 319-326.

Capello, Edoardo, Piermaria Davoli, Gianluca Bassanini et Alessandro Bisi. 1999. « Residual stresses and surface roughness in turning ». *Journal of engineering materials and technology,* vol. 121, n° 3, p. 346-351.

Cordebois, Jean-Pierre, et Michel Colombié. 2008. *Fabrication par usinage-2ème édition*. Dunod.

da Silva, Leonardo Roberto, Eduardo Carlos Bianchi, Ronaldo Yoshinobu Fusse, Rodrigo Eduardo Catai, Thiago Valle França et Paulo Roberto Aguiar. 2007. « Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 47, n° 2, p. 412-418.

Dahlman, Patrik, Fredrik Gunnberg et Michael Jacobson. 2004. « The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 147, n° 2, p. 181-184.

Davim, J Paulo. 2003. « Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays ». *Journal of materials processing technology,* vol. 132, n° 1, p. 340-344.

Derringer, George. 1980. « Simultaneous optimization of several response variables ». *Journal of quality technology,* vol. 12, p. 214-219.

Dhar, NR, M Kamruzzaman et Mahiuddin Ahmed. 2006. « Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel ». *Journal of materials processing technology,* vol. 172, n° 2, p. 299-304.

Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S., & Mithu, M. A. H. 2006. « The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel ». Journal of Materials Processing Technology, 171(1), 93-99.

Felder, Eric. 2007. « Plasticité en mise en forme: Rappels de base, faits expérimentaux ». *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, n° M3002.

García Navas, Virginia, Oscar Gonzalo et Ion Bengoetxea. 2012. « Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 61, p. 48-57.

Goupy, Jacques. 2005. *Pratiquer les plans d'expériences*. Dunod.

Gunnberg, Fredrik, Marcel Escursell et Michael Jacobson. 2006. « The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 174, n° 1, p. 82-90.

Harrington, EC. 1965. « The desirability function ». *Industrial quality control,* vol. 21, n° 10, p. 494-498.

Jang, DY, TR Watkins, KJ Kozaczek, CR Hubbard et OB Cavin. 1996. « Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel ». *Wear,* vol. 194, n° 1, p. 168-173.

Javidi, Ataollah, Ulfried Rieger et Wilfried Eichlseder. 2008. « The effect of machining on the surface integrity and fatigue life ». *International journal of Fatigue,* vol. 30, n° 10, p. 2050-2055.

Kamguem, R, A Djebara et V Songmene. 2013. « Investigation on surface finish and metallic particle emission during machining of aluminum alloys using response surface methodology and desirability functions ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 69, n° 5-8, p. 1283-1298.

Kandananond, Karin. 2009. « The determination of empirical model for surface roughness in turning process using design of experiment ». *WSEAS Transactions on Systems,* vol. 8, n° 10, p. 1135-1144.

Kouam, J, V Songmene, M Balazinski et P Hendrick. 2012. « Dry, Semi-Dry and Wet Machining of 6061-T6 Aluminium Alloy ».

Leppert, Tadeusz. 2011. « Effect of cooling and lubrication conditions on surface topography and turning process of C45 steel ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 51, n° 2, p. 120-126.

LU, Jian. 2006. « Traitements de surface mécaniques Principes ». *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, n° M1190.

Makadia, Ashvin J, et JI Nanavati. 2013. « Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology ». *Measurement,* vol. 46, n° 4, p. 1521-1529.

Myers, Raymond H, Douglas C Montgomery et Christine M Anderson-Cook. 2009. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 705. John Wiley & Sons.

Neşeli, Süleyman, Süleyman Yaldız et Erol Türkeş. 2011. « Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology ». *Measurement,* vol. 44, n° 3, p. 580-587.

Puertas Arbizu, I, et CJ Luis Perez. 2003. « Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 143, p. 390-396.

Ramana, M Venkata, G Krishna Mohan Rao et D Hanumantha Rao. 2014. « Optimization and Effect of Process Parameters on Tool Wear in Turning of Titanium Alloy under Different Machining Conditions ».

Sreejith, PS. 2008. « Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions ». *Materials letters,* vol. 62, n° 2, p. 276-278.

Sung, AN, MM Ratnam et WP Loh. 2014. « Effect of tool nose profile tolerance on surface roughness in finish turning ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-16.

Tomac, Nikola, K Tannessen et Finn Ola Rasch. 1992. « Machinability of particulate aluminum matrix composites ». *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* vol. 41, n° 1, p. 55-58.