

**Université du 8 mai 1945 – Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



# **Mémoire de fin d'étude**

Présenté par : **DAOUD Hicham**

**Master**

**Option : Construction Mécanique**

=====

**Etude Comparative Entre Les Performances Des Outils  
Céramiques (CC650WG, CC650) En Tournage Dur De L'acier  
100Cr6**

=====

**Sous La Direction De : *DR. BOUCHELAGHEME HADJIRA***

**Année universitaire 2018/2019**

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années .Nous tient également à exprimer mon vifs remerciements à mon encadreur*

***DR .BOUCHELAGHEME HADJIRA** pour avoir d'abord proposé ce sujet et de son suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*J'adresse aussi à tous les enseignants de notre département de Génie Mécanique de m'avoir apporté leur soutien pour réaliser ce travaille.*

## Dédicace :

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à  
ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à  
leurs exprimer mon amour sincère*

*À mon père, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes  
études*

*À la femme qui a souffert sans me laisse souffrir, qui n'a jamais dit non  
à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre  
heureux : ma adorable mère*

*À mes frères, puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et  
surtout réussite*

*À toute ma famille ;*

*À tous mes amis ;*

*À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment*

## ملخص

التقدم التكنولوجي، مكن من استعمال المواد الصلبة جدا ذات تشغيلية صعبة في عدة ميادين. استعمال أدوات القطع المصنوعة من الفولاذ السريع والكربيد المعدني لم تعد تلبي الغرض ولهذا نحن مجبرون لاستعمال أدوات قطع أخرى تستجيب لمتطلبات الصناعات الجديدة، وتواكب التقدم التكنولوجي فيما يخص شروط القطع.

في هذا الإطار قمنا بإجراء دراسة تشغيلية للفولاذ المعالج حراريا 100Cr6 تصل صلادته الى (60HRC)، باستخدام أدوات قطع من الخزف (CC650) والمعدلة هندسيا (Wiper) (CC650WG)

الهدف من هذه الدراسة هو فحص مختلف الظواهر المتداخلة أثناء التشغيل الجاف للفولاذ المقسى منها: قوى القطع والخشونة بدلالة مختلف شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التقدم وعمق التمريرة) من ناحية أخرى قمنا بتحليل إحصائي للنتائج باستعمال تصميم تاكوشي (Taguchi) 16 تجربة على أساس تحليل شروط التغير (ANOVA) وطريقة السطح المرجعي (RMS) وهذا من أجل إنجاز نماذج رياضية للخشونة وقوى القطع.

### الكلمات المفتاحية:

خراطة الصلبة، مواد القطع الخشونة، قوى القطع، استطاعة القطع، تحليل التغير (ANOVA)، طريقة القطع المرجعي (RMS)

## Résumé

Les progrès techniques actuels ont favorisé l'emploi des matériaux très durs d'usinabilité très difficile dans plusieurs domaines. L'utilisation des outils en acier rapide, carbure et cermet ne remplit pas les conditions, ce qui nous oblige de faire appel à des outils de coupe qui répondent aux exigences de coupe.

Dans ce sens nous avons réalisé ce travail qui concerne une étude comparative de l'usinabilité de l'acier 100Cr6 traités à 60 HRC, avec des outils de coupe en céramique (CC650) et Wiper (CC650WG), car ils sont très utilisés en tournage des pièces traitées thermiquement.

L'objectif de cette étude est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenant lors de l'usinage à sec de l'acier dur 100Cr6 tels que, les efforts de coupe et la rugosité avec la variation des différents paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats pour un plan de Taguchi (16 essais) basé sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de la surface de réponse (RMS) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité et d'effort de coupe.

**Mots clé :** Tournage dur, Matériaux de coupe, Rugosité, Effort de coupe, Analyse de variance (ANOVA), RMS.

## Abstract

Current technical progress has favored the use of very hard materials, of very difficult machinability in several field. The use of the high speed steel tools, carbide and cermet do not fulfill the conditions, that is what obliges us to call upon cutting tools which fit to the cut's requirement.

By this sense, we have made machinability of difficult steel 100Cr6 with the tools out of ceramic (CC650) and Wiper (CC650WG) they are widely used in the turning of heat-treated parts

The objective of this research is to examine the various phenomena intervening during the dry machining of the hard steel 100Cr6 such as, the cutting forces and roughness, with the variation of the various cutting parameters ( $V_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ). In addition, we made a statistical analysis of the results Taguchi plan 16 trials, based on the variance analysis (ANOVA) and the response methodology of the surface (RMS) and that with an aim of proposing mathematical models of roughness and cutting forces.

**Keywords:** Hard turning, Materials of cut, Roughness, Cutting forces, Analysis variance (ANOVA), Response Methodology of the Surface (RMS).

# Liste de figures

## Chapitre I

<b>Figure I-1:</b> Opération de chariotage en tournage.....	6
<b>Figure I-2:</b> Évolution de la micro dureté entre structure pièce et outil. ....	7
<b>Figure I-3:</b> Marché du poly-cristallin (Pv-BN) par type d'industrie utilisant le tournage dur. .	7
<b>Figure I-4:</b> Caractéristiques du profil .....	12
<b>Figure I-5:</b> Principaux défauts de surface.....	13
<b>Figure I-6:</b> Les composantes de l'effort de coupe.....	15
<b>Figure I-7:</b> Matériaux de coupe. ....	16
<b>Figure I-8:</b> Classification Matériaux de coupe. ....	16
<b>Figure I-9:</b> Les Céramiques. ....	18
<b>Figure I-10:</b> Plaquette CBN.....	18
<b>Figure I-11:</b> Effet de la ( $V_c, f$ et $a_p$ ) sur les efforts de coupe pour les quatre nuances (CC6050WH, CC6050, CC650WG, et CC650) [AOU 16]. ....	19
<b>Figure I-12:</b> Evolution de la rugosité $R_a$ en fonction $V_c, f, r$ et $a_p$ . [Add 15]. ....	20
<b>Figure I-13:</b> Comparaison de $R_a$ and $R_z$ en tournage avec des plaquettes conventionnelles et Wiper [PEI 16]. ....	21
<b>Figure I-14:</b> Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la puissance et la pression.....	22
<b>Figure I-15:</b> Influence des paramètres de coupe sur $R_a$ pour la fonte blanche.....	23

## Chapitre II

<b>Figure II-1:</b> Tour à charioter et à fileter modèle SN40. ....	25
<b>Figure II-2:</b> éprouvette utilisée. ....	26
<b>Figure II-3:</b> Diagramme de revenu et bande de Jominy de l'acier 100Cr6. ....	27
<b>Figure II-4:</b> Four à chambre électrique pour le traitement thermique d'éprouvette.....	27
<b>Figure II-5:</b> Porte-outils utilisés. ....	28
<b>Figure II-6:</b> plaquettes de coupe utilisée. ....	30
<b>Figure II-7:</b> Mesure de rugosité sans démontage de la pièce .....	31
<b>Figure II-8:</b> Station AltiSurf® 500. ....	31
<b>Figure II-9:</b> Chaîne de mesure de la rugosité en 3D.....	33

<b>Figure II-10:</b> Plateforme KISTLER. ....	<b>34</b>
<b>Figure II-11:</b> Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	<b>34</b>

### *Chapitre III*

<b>Figure III-1 :</b> Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur la rugosité $R_a$ . -----	<b>44</b>
<b>Figure III-2:</b> Diagramme d'interaction pour $R_a$ . -----	<b>44</b>
<b>Figure III-3:</b> Graphe de PARETO de la rugosité $R_a$ . -----	<b>45</b>
<b>Figure III-4:</b> courbe de normalité pour $R_a$ -----	<b>46</b>
<b>Figure III-5 :</b> courbe des résiduels pour $R_a$ -----	<b>46</b>
<b>Figure III-6:</b> Diagrammes de surface 3D de $R_a$ en fonction de $V_c$ ; $f$ ; $a_p$ . -----	<b>47</b>
<b>Figure III-7:</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $R_a$ .-----	<b>48</b>
<b>Figure III-8 :</b> Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_x$ ). -----	<b>49</b>
<b>Figure III-9:</b> Diagramme d'interaction pour $F_x$ . -----	<b>49</b>
<b>Figure III-10 :</b> Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort axial ( $F_x$ ) -----	<b>50</b>
<b>Figure III-11 :</b> courbe de normalité pour $F_x$ .-----	<b>51</b>
<b>Figure III-12 :</b> courbe des résiduels pour $F_x$ -----	<b>51</b>
<b>Figure III-13:</b> Diagrammes de surface 3D de ( $F_x$ ) en fonction de ( $V_c$ ; $f$ ; $a_p$ ). -----	<b>52</b>
<b>Figure III-14 :</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_x$ . -----	<b>53</b>
<b>Figure III-15:</b> Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_y$ ). -----	<b>55</b>
<b>Figure III-16:</b> Diagramme d'interaction pour $F_y$ .-----	<b>55</b>
<b>Figure III-17:</b> courbe de normalité pour $F_y$ -----	<b>56</b>
<b>Figure III-18:</b> courbe des résiduels pour $F_y$ -----	<b>56</b>
<b>Figure III-19:</b> Diagrammes de surface 3D de ( $F_y$ ) en fonction de ( $V_c$ ; $f$ ; $a_p$ )-----	<b>57</b>
<b>Figure III-20 :</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_y$ . -----	<b>58</b>
<b>Figure III-21:</b> Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_z$ ) . -----	<b>60</b>
<b>Figure III-22</b> Diagramme d'interaction pour $F_z$ CC650. -----	<b>60</b>
<b>Figure III-23</b> Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort ( $F_z$ ) . --	<b>61</b>
<b>Figure III-24 :</b> courbe de normalité pour. -----	<b>62</b>
<b>Figure III-25 :</b> $F_z$ courbe des résiduels pour $F_z$ -----	<b>62</b>
<b>Figure III-26 :</b> Diagrammes de surface 3D de ( $F_z$ ) en fonction de ( $V_c$ ; $f$ ; $a_p$ ) -----	<b>63</b>
<b>Figure III-27 :</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_z$ . -----	<b>64</b>

<b>Figure III-28</b> : Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur la rugosité $R_a$ .-----	<b>66</b>
<b>Figure III-29</b> Diagramme d'interaction pour $R_a$ -----	<b>66</b>
<b>Figure III-30</b> : Graphe de PARETO de la rugosité -----	<b>67</b>
<b>Figure III-31</b> : courbe de normalité pour $R_a$ . -----	<b>68</b>
<b>Figure III-32</b> : courbe des résiduels pour $R_a$ . -----	<b>68</b>
<b>Figure III-33</b> : Diagrammes de surface 3D de $R_a$ en fonction de $(V_c ; f ; a_p)$ . -----	<b>69</b>
<b>Figure III-34</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $R_a$ -----	<b>70</b>
<b>Figure III-35</b> : Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_x$ ) -----	<b>72</b>
<b>Figure III-36</b> : Diagramme d'interaction pour $F_x$ -----	<b>72</b>
<b>Figure III-37</b> : Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort axial ( $F_x$ ).-----	<b>73</b>
<b>Figure III-38</b> : courbe de normalité pour $F_x$ . -----	<b>74</b>
<b>Figure III-39</b> : courbe des résiduels pour $F_x$ . -----	<b>74</b>
<b>Figure III-40</b> : Diagrammes de surface 3D de ( $F_x$ ) en fonction de $(V_c ; f ; a_p)$ . -----	<b>75</b>
<b>Figure III-41</b> : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_x$ -----	<b>76</b>
<b>Figure III-42</b> : Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_y$ ).-----	<b>78</b>
<b>Figure III-43</b> : Diagramme d'interaction pour $F_y$ . -----	<b>78</b>
<b>Figure III-44</b> : Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort ( $F_y$ ) --	<b>79</b>
<b>Figure III-45</b> : courbe de normalité pour $F_y$ . -----	<b>80</b>
<b>Figure III-46</b> : courbe des résiduels pour $F_y$ . -----	<b>80</b>
<b>Figure III-47</b> : Diagrammes de surface 3D de ( $F_y$ ) en fonction de $(V_c ; f ; a_p)$ .-----	<b>81</b>
<b>Figure III-48</b> : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_y$ . -----	<b>82</b>
<b>Figure III-49</b> : Graphe des effets principaux de $V_c$ , $f$ et $a_p$ sur l'effort de coupe ( $F_z$ )-----	<b>83</b>
<b>Figure III-50</b> : Diagramme d'interaction pour $F_z$ -----	<b>83</b>
<b>Figure III-51</b> : Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort ( $F_z$ ). -	<b>84</b>
<b>Figure III-52</b> : courbe de normalité pour $F_z$ -----	<b>85</b>
<b>Figure III-53</b> : courbe des résiduels pour $F_z$ .-----	<b>85</b>
<b>Figure III-54</b> : Diagrammes de surface 3D de ( $F_z$ ) en fonction de $(V_c ; f ; a_p)$ -----	<b>86</b>
<b>Figure III-55</b> : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $F_z$ . -----	<b>87</b>
<b>Figure III-56</b> : Topographie en 3D de l'état de surface pendant le tournage dur de l'acier 100Cr6 avec la céramique CC650 pour $V_c = 190\text{m/min}$ et $a_p = 0,20\text{ mm}$ ; a) $f = 0,08$ $\text{mm/tr}$ et b) $f = 0,2\text{ mm/tr}$ -----	<b>88</b>
<b>Figure III-57</b> : Topographie en 3D de l'état de surface pendant le tournage dur de l'acier 100Cr6 avec la céramique conventionnelle Wiper CC650WG pour $V_c = 190\text{m/min}$ et $a_p = 0,20\text{ mm}$ ; -----	<b>89</b>

# Liste de tableau

## Chapitre I

Tableau I-1: Défèrent type de défauts de rugosité [10]. .....	14
---	----

## Chapitre II

Tableau II-1: Composition chimique de l'acier 100Cr6. ....	26
Tableau II-2: Conditions du traitement thermique de l'acier utilisé. ....	26
Tableau II-3: Caractéristiques du four électrique. ....	28
Tableau II-4: Caractéristiques géométriques de porte-outils. ....	28
Tableau II-5: Informations relatives aux matériaux de coupe utilisés. ....	29
Tableau II-6: Conditions de coupe pour les essais de la rugosité. ....	36
Tableau II-7: Conditions de coupe pour matrice de Taguchi ( $L_{16}$ ). ....	36
Tableau II-8: Matrice de planification de Taguchi $L_{16}$ . ....	37

## Chapitre III

Tableau III-1 Résultats de la rugosité et les efforts de coupes suivant $L_{16}$ . ....	42
Tableau III-2: Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité $R_a$ .....	43
Tableau III-3: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de $R_a$ . ....	47
Tableau III-4: Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axiale ( $F_x$ ). ....	48
Tableau III-5 : Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de ( $F_x$ ). ....	53
Tableau III-6: Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial( $F_y$ ) . ....	54
Tableau III-7: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de $F_y$ . ....	58
Tableau III-8 : Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel ( $F_z$ ). ....	59
Tableau III-9 : Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de $F_z$ . ....	63
Tableau III-10: Résultats de la rugosité et les efforts de coupes suivant $L_{16}$ .....	64
Tableau III-11: Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité $R_a$ .....	65
Tableau III-12: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites. ....	70
Tableau III-13: Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axiale ( $F_x$ ) .....	71
Tableau III-14: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de $F_x$ . ....	76
Tableau III-15 : Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial( $F_y$ ). ....	77
Tableau III-16: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de ( $F_y$ ). ....	81
Tableau III-17: Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) .....	82
Tableau III-18 : Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de $F_z$ . ....	86

# ***SOMMAIRE***

<b>NOMENCLATURE</b> .....	1
---------------------------	---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	2
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Étude bibliographique**

I.1	Introduction:.....	5
I.2	Le Tournage Dur:.....	5
I.2.1	Définition du TD:.....	6
I.2.2	Avantage du tournage dur:.....	7
I.2.3	Objectif du TD:.....	8
I.2.4	Les matériaux usinés en tournage dur:.....	8
I.3	Rugosité des surfaces :.....	11
I.3.1	Généralités sur les états de surface :.....	11
I.3.2	Définitions de la rugosité :.....	11
I.3.3	Principaux défauts de surface:.....	12
I.3.4	Défauts de la rugosité :.....	13
I.4	Les efforts de coupe :.....	14
I.4.1	Définition et intérêt de leur mesure :.....	14
I.5	Les matériaux de coupe :.....	15
I.5.1	Introduction :.....	15
I.5.2	Classification des matériaux des outils de coupe:.....	16
I.6	Etat de l'art sur l'usinage des pièces dures :.....	19

## **Chapitre II : Procédure et équipements d'expérience**

II.1	Introduction :.....	25
II.2	Equipements utilisés :.....	25

II.2.1	Machine-outil :.....	25
II.2.2	Matériau utilisé pour les essais d'usinage :.....	26
II.2.3	Traitement thermique des éprouvettes :.....	26
II.2.3.1	Conditions du traitement thermique :.....	26
II.2.4	Outils de coupe utilisés :.....	28
II.2.4.1	Porte plaquette :.....	28
II.2.4.2	Plaquettes de coupe :.....	29
II.2.5	Équipement de mesure :.....	30
II.2.5.1	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :.....	30
II.2.5.2	Station AltiSurf pour la mesure la rugosité en 3D :.....	31
II.2.5.3	Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :.....	33
II.3	Autres équipements utilisées.....	34
II.4	Conditions de coupe :.....	34
II.5	Planification des expériences.....	35
II.5.1	Méthode unifactorielle :.....	35
II.5.2	Méthode multifactorielle.....	35
II.5.3	Méthode de Taguchi.....	36

### **Chapitre III : Modélisation des paramètres de coupe par RMS et Taguchi**

III.1	Introduction.....	39
III.2	Planification expérimentale :.....	39
III.2.1	Étapes de la méthodologie de surface de réponse.....	39
III.2.2	Modèle de la réponse :.....	40
III.2.3	Teste de validité des modèles.....	41
III.3	Plaquette en céramique conventionnel CC650 :.....	42
III.3.1	Résultats des expériences :.....	42
III.3.2	Modèle de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe :.....	43
III.3.2.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra :.....	43

III.3.2.2	Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction : -----	43
III.3.2.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) : -----	45
III.3.2.4	Analyse de régression ( Ra) en fonction de Vc ; f et ap :-----	45
III.3.2.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	46
III.3.2.6	Diagrammes de surface 3D de (Ra) : -----	46
III.3.2.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	47
III.3.3	Modèle de l'effort de coupe (Fx) en fonction des paramètres de coupe :-----	48
III.3.3.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial(Fx) : -----	48
III.3.3.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction -----	49
III.3.3.3	Facteurs influents (graphe de Pareto) : -----	50
III.3.3.4	Analyse de régression ( Fx) en fonction de Vc ; f et ap-----	50
III.3.3.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	51
III.3.3.6	Diagrammes de surfaces 3D de (Fx):-----	51
III.3.3.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	52
III.3.4	Modèle de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe(Fy) : -----	54
III.3.4.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial (Fy) : -----	54
III.3.4.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :-----	54
III.3.4.3	Analyse de régression ( Fy) en fonction de Vc ; f et ap-----	56
III.3.4.4	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	56
III.3.4.5	Diagrammes de surface 3D de (Fy):-----	57
III.3.4.6	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	58
III.3.5	Modèle de l'effort de coupe (Fz) en fonction des paramètres de coupe :-----	59
III.3.5.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel (Fz) : -----	59
III.3.5.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction -----	59
III.3.5.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) : -----	61
III.3.5.4	Analyse de régression ( Fz) en fonction de Vc ; f et ap-----	61
III.3.5.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	62

III.3.5.6	Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) : -----	62
III.3.5.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	63
III.4	Plaquette en céramique Wiper CC650WG :-----	64
III.4.1	Résultats des expériences -----	64
III.4.2	Modèle de la rugosité(Ra) en fonction des paramètres de coupe :-----	65
III.4.2.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra :-----	65
III.4.2.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction pour Ra -----	65
III.4.2.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) : -----	67
III.4.2.4	Analyse de régression ( Ra) en fonction de Vc ; f et ap :-----	67
III.4.2.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	68
III.4.2.6	Diagrammes de surface 3D de (Ra) :-----	68
III.4.2.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	69
III.4.3	Modèle de l'effort de coupe(Fx) en fonction des paramètres de coupe : -----	71
III.4.3.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial(Fx) :-----	71
III.4.3.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :-----	71
III.4.3.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) : -----	73
III.4.3.4	Analyse de régression ( Fx )en fonction de Vc ; f et ap-----	74
III.4.3.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	74
III.4.3.6	Diagrammes de surfaces 3D de (Fx):-----	75
III.4.3.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	76
III.4.4	Modèle de l'effort de coupe (Fy) en fonction des paramètres de coupe :-----	77
III.4.4.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial (Fy) : -----	77
III.4.4.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :-----	77
III.4.4.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) : -----	79
III.4.4.4	Analyse de régression ( Fy) en fonction de Vc ; f et ap :-----	79
III.4.4.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	80
III.4.4.6	Diagrammes de surface 3D de (Fy) :-----	80

III.4.4.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	81
III.4.5	Modèle de l'effort de coupe (Fz) en fonction des paramètres de coupe :-----	82
III.4.5.1	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel (Fz) :-----	82
III.4.5.2	Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :-----	83
III.4.5.3	Facteurs influents (Graphe de Pareto) :-----	84
III.4.5.4	Analyse de régression (Fz) en fonction de Vc ; f et ap-----	84
III.4.5.5	Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :-----	85
III.4.5.6	Diagrammes de surfaces 3D de (Fz):-----	85
III.4.5.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :-----	86
III.5	Topographie des surfaces en 3D :-----	87
III.6	Conclusion-----	90
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>91</b>

## *Nomenclature*

ANOVA :	Analyse de variance.
<i>ap</i> :	Profondeur de passe (mm).
<i>CM ajust</i> :	Les carrés moyens ajustés.
<i>D</i> :	diamètre de l'éprouvette (mm).
<i>DL</i> :	Le nombre total de degrés de liberté.
<i>L</i> :	longueur de l'éprouvette (mm).
<i>f</i> :	Avance par tour (mm/tr).
<i>F</i> :	Effort de coupe résultant (N).
<i>Fa (Fx)</i> :	Effort de coupe axial (N).
<i>Fr (Fy)</i> :	Effort de coupe radial (N).
<i>Fv (Fz)</i> :	Effort de coupe tangentiel (N).
<i>HRC</i> :	Dureté Rockwell Cône.
<i>MSR</i> :	Méthodologie de surface de réponse.
<i>R<sup>2</sup></i> :	Coefficient de détermination.
<i>Ra</i> :	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu\text{m}$ ).
<i>Rt</i>	Rugosité totale ( $\mu\text{m}$ ).
<i>Rz</i>	Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu\text{m}$ ).
<i>SomCar ajust</i> :	Les sommes des carrés ajustées.
<i>Terme SomCar séq</i> :	La somme des carrés séquentielle.
<i>TTh</i>	Traitement thermique.
<i>Valeur P</i> :	La valeur de p est la probabilité.
<i>Vc</i> :	Vitesse de coupe (m/min).

## Introduction Générale

De nos jours, les industries de fabrication ont pour objectifs, la réduction des coûts d'exploitation ainsi que l'amélioration de la qualité du produit. Dans les procédés d'usinage par enlèvement de la matière, le coût de l'opération d'usinage, la qualité de la surface des pièces usinées, l'augmentation de la productivité par le bon choix des conditions de coupe optimales sont les principaux objectifs des fabricants des pièces mécaniques.

L'usinage des matériaux trempés ayant une dureté supérieur à 60 HRC, connu comme une nouvelle technique d'usinage est appelé **tournage dur**. Cette technique est réalisée avec une gamme d'outils de coupe caractérisés par une grande dureté, bonne résistance à chaud, aux chocs et à l'usure (Céramiques, CBN, ... etc.). Notre travail s'inscrit dans ce cadre, en effet il consiste à mener une étude expérimentale de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec un outil de coupe en Céramique CC650 et Wiper CC650WG. L'objectif est comparaison des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels la rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe.

La rédaction de ce mémoire est structurée en trois chapitres :

Dans le **premier chapitre**, nous présentons une étude bibliographique sur le tournage dur, les outils de coupes, les définitions des paramètres technologiques et un état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre sujet d'étude.

Le **deuxième chapitre**, présente la planification des expériences, les équipements nécessaires à utilisés et les conditions expérimentales, Les dispositifs de mesure.

Le **troisième chapitre** comporte une étude comparative entre l’outil céramique conventionnel (CC650) et la céramique Wiper (CC650WG). Nous utilisons la méthode de Taguchi plan (16 essais) et une analyse statistique de la variance (ANOVA) des résultats, afin de développer les modèles mathématiques des facteurs de réponse (efforts de coupe et la rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l’avance par tour et la profondeur de coupe) lors de l’usinage dur de l’acier 100Cr6.

Les logiciels (MINITAB 18) et (Design-Expert10) sont utilisés pour déterminer les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées aux modèles.

Une analyse a été faite avec le graphe de Pareto qui a permis d’évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur le facteur étudié.

Une représentation des topographies en 3D des surfaces usinées, sont visualisées sous forme isométriques. Dans ce chapitre nous présentons aussi une comparaison entre les résultats obtenus par les équations de prédictions et les mesures expérimentales.

En fin, nous avons fait une conclusion générale sur cette étude.

# *Chapitre I*

---

## **Étude bibliographique**

---

## I.1 Introduction :

Dans le domaine de la fabrication et l'usinage des matériaux l'objectif principal c'est la recherche d'une relation entre l'amélioration de l'état de la surface, le coût et les conditions de travail rigide. Les meilleurs outils de coupe les plus répandus dans le domaine de la fabrication caractérisés par une grande dureté, durée de vie importante et bonne résistance aux chocs, les outils modernes dans le monde industriel (CBN, céramiques, carbures revêtus) sont utilisés beaucoup plus lors de l'usinage de l'acier durci en tournage dur.

## I.2 Le Tournage Dur :

Le tournage des métaux durs est un procédé assez récent dans son utilisation.

Le but de celui-ci est, à termes de supprimer lors de l'usinage des pièces de précision, la phase de rectification, souvent longue et coûteuse.

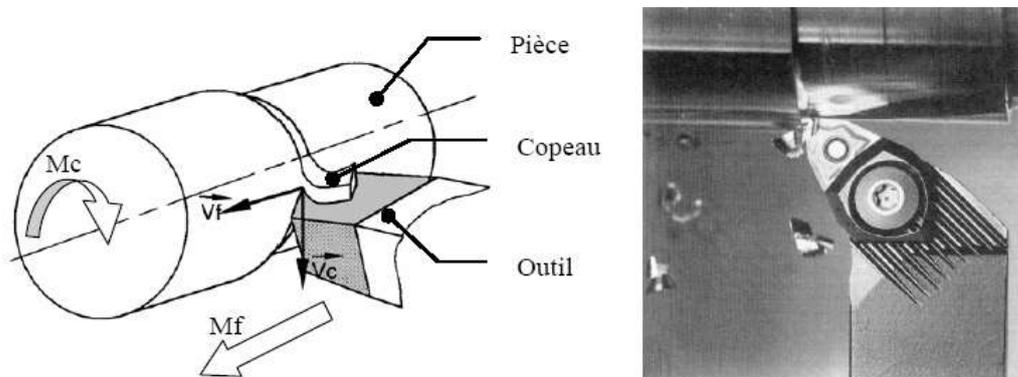
Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de par les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces. En effet, avec les méthodes d'usinage conventionnel, là où une grande dureté fonctionnelle des pièces est demandée (50 à 65 HRC), consiste à faire les différentes phases successives suivantes :

- Usinage de la pièce à l'état non traité ;
- Traitement thermique jusqu'à l'obtention de la dureté désirée ;
- Finition par rectification pour que la pièce respecte les côtes notifiées sur le dessin de définition.

Cette longue séquence d'opérations est causée en partie par :

- La non disponibilité (jusqu'à récemment) d'un matériau à outil coupant les matériaux de hautes duretés, résistant à l'usure et tenace.
- La mauvaise appréciation du besoin en machines-outils plus puissantes, plus rigides et plus précises.
- La pratique traditionnelle qui consiste à faire l'ébauchage sur une machine et après faire la finition sur une autre machine plus précise.

Ce type d'usinage conventionnel implique donc des montages et des démontages des pièces qui sont inutiles avec le tournage dur. Avec le nouveau mode d'usinage, le brut peut être usiné directement après traitement thermique et beaucoup d'opérations peuvent être supprimées par substitution d'une opération à deux, donnant ainsi un gain considérable aussi bien en temps qu'en coût [1], [2].



**Figure I-1:** Opération de chariotage en tournage.

### I.2.1 Définition du tournage dur :

Le tournage dur concerne le tournage de matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe, et dans certain cas d'ébauche.

Les matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

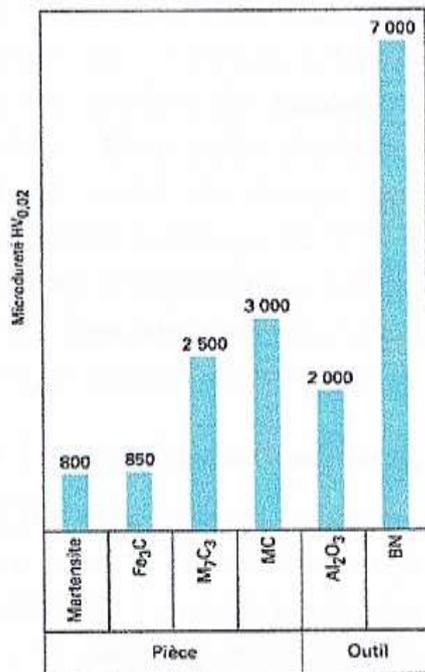
- Une grande dureté (résistance à la pénétration) comme le montre la (Figure I-2) ;
- Un pouvoir abrasif élevé ;
- Une faible ductilité ;
- Un grand rapport entre la dureté et le module d'élasticité (module d' Young).[3]

Le mot **Dur** signifie :

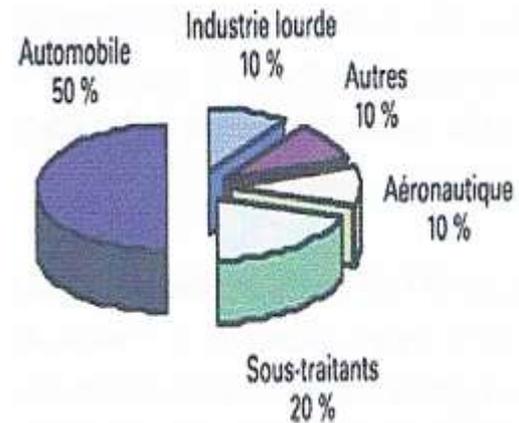
- Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur ;
- Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité (un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur) ;
- Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs,...) [4].

A l'origine, ce terme "*dur*" ne concernait que la grande dureté du matériau usiné.

Avec l'arrivée de nouveaux matériaux, des géométries de pièces plus complexes, ce vocable s'est généralisé à d'autres dimensions [5].



**Figure I-2:** Évolution de la micro dureté entre structure pièce et outil.



**Figure I-3:** Marché du poly-cristallin (Pv-BN) par type d'industrie utilisant le tournage dur.

La (**FigureI-3**) montre les principales industries intéressées par ce type de technologie :

- L'industrie automobile (pignons, arbre de boîte) ;
- L'industrie du roulement ;
- La mécanique générale (outillage)...etc.

L'un des objectifs actuels du tournage dur est d'être complémentaire, voire concurrentiel (dans certains cas) de la rectification. Les états de surface obtenus sont remarquables (jusqu'à des rugosités Ra de 0,1  $\mu\text{m}$ ), les tolérances dimensionnelles sont de qualité 6 et des tolérances géométriques très précises (circularité inférieure à 1  $\mu\text{m}$ ).

L'un des facteurs essentiels pour l'obtention de ces critères de qualité étant la machine-outil.

### I.2.2 Avantage du tournage dur :

Pour mieux présenter les avantages de l'usinage dur, on se base sur les quatre critères fondamentaux de production en tournage suivants

**A. Productivité :**

- Taux d'enlèvement de matière supérieur aux autres procédés d'usinage conventionnel [6],
- Application de la petite à la grande série,
- Réalisation des formes complexes et réglages des machines rapides,
- Productions de plus en plus variables.

**B. Qualité :**

- Travail sans reprise sur la machine.

**C. Investissement :**

- Réduction considérable des investissements machine et outil (une rectifieuse coûte à peu près deux fois le prix d'un tour à CN),
- Suite à son industrialisation croissant rapidement, le prix des plaquettes c-BN est en forte baisse.

**D. Environnement :**

- Le tournage dur génère des copeaux recyclables et non des boues de rectification.

**I.2.3 Objectif du tournage dur :**

L'objectif du tournage dur (TD) est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification. Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surfaces. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de 0,15  $\mu\text{m}$ , approchant les valeurs obtenues en rectification inférieures à 0,15  $\mu\text{m}$ . Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à 1  $\mu\text{m}$  peuvent être observés [7].

**I.2.4 Les matériaux usinés en tournage dur :**

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées... [8].

**• Les aciers de construction pour TTh :**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faibles vitesses de coupe, les outils en aciers rapides et en carbure cémenté sont peu efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à des températures élevées. Par conséquent, l'usinage des alliages ferreux traités (45HRC à 70HRC) constitue le principal domaine d'application des outils céramiques

et CBN. La prudence invite à dire qu'un des matériaux devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 30HRC ou 1020MPa.

- **Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...) :**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelle. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de découpe, outils d'extrusion,...

- **Les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4...) :**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité et leur aptitude au polissage leur permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules à couler sous pression, filage à chaud, vis d'extrudeuse, lame de cisaille à chaud. La dureté après revenu peut varier de 30HRC à 55HRC.

- **les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...) :**

L'acier XC48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique est livré à l'état trempé et revenu a une résistance de 1000 à 1100 MPa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la resulfuration. Ces aciers à moules sont utilisés pour la réalisation des carcasses de moules pour matières plastiques, semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte empreintes,...

- **les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100) :**

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiC).

- **Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8) :**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid.

- **Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...) :**

L'usinage de finition et la coupe continue d'aciers de cémentation de dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des CBN à haute vitesse de coupe. En général le liant céramique TiC est plus performant qu'un métal liant CBN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de Pc-BN. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

- **Les aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10) :**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide ionique, la dureté des couches peut varier 850HV à 1400HV. Suivant le procédé de nitruration et selon les matériaux traités.

L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté est produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ses couches fines est très dur.

- **Les fontes :**

Les fontes grises, blanches en et nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques.

Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320HB. Dans ce cas, les

Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique.

Cependant d'autres auteurs ont affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise.

Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65HRC.

Des additions de nickel et de Chrome produisent un type de fonte blanche martensitique qui est habituellement connue sous le nom de Ni-Hard. Elle est caractérisée par une dureté de 50 à 65HRC et qui est largement employée comme pièces d'usure. Les fontes Ni-Hard chrome sont dures, fragiles et difficiles à usiner. La haute dureté de ces fontes limite l'utilisation des outils carbure à des conditions de coupe non économiques.

- **Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite) :**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires.

Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écaillent également. L'usure en entaille sur la face de dépouille et le principal problème. Les alliages à base de nickel et de cobalt sont habituellement usinés avec des outils en carbure avec des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min.

### **I.3 Rugosité des surfaces :**

#### **I.3.1 Généralités sur les états de surface :**

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

#### **I.3.2 Définitions de la rugosité :**

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

- **Surface géométrique :**

Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

➤ **Surface spécifiée :**

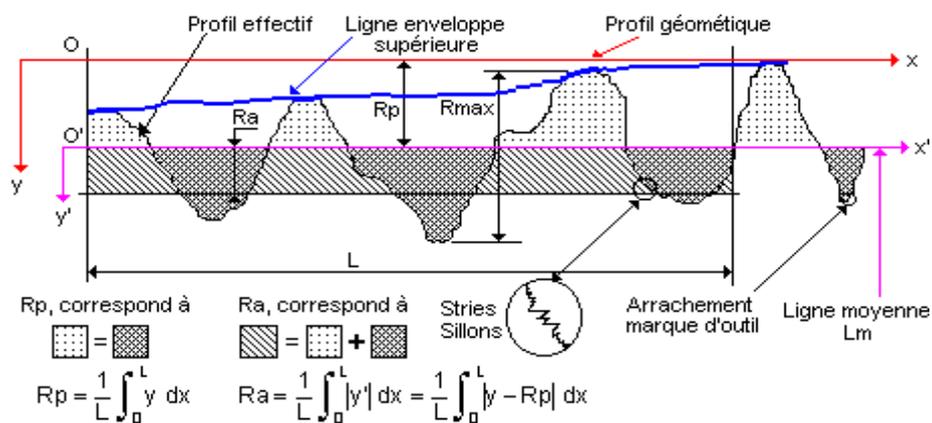
Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

➤ **Surface mesurée :**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

➤ **Surface réelle :**

Surface obtenue au cours de la fabrication (**Figure I-4**).



**Figure I-4:** Caractéristiques du profil

- ❖ **L :** Longueur de base du profil moyen.
- ❖ **R<sub>p</sub> :** Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.
- ❖ **R<sub>a</sub> :** Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').

### I.3.3 Principaux défauts de surface :

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. En général les défauts de surface jouent un rôle important pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (**Figure I-5**).

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut a périodique.
- **Défauts du deuxième ordre** : Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.
- **Défauts du troisième et quatrième ordre** : Ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3ème ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piquûre ... etc. Ce type de défaut a un caractère a périodique. [9]

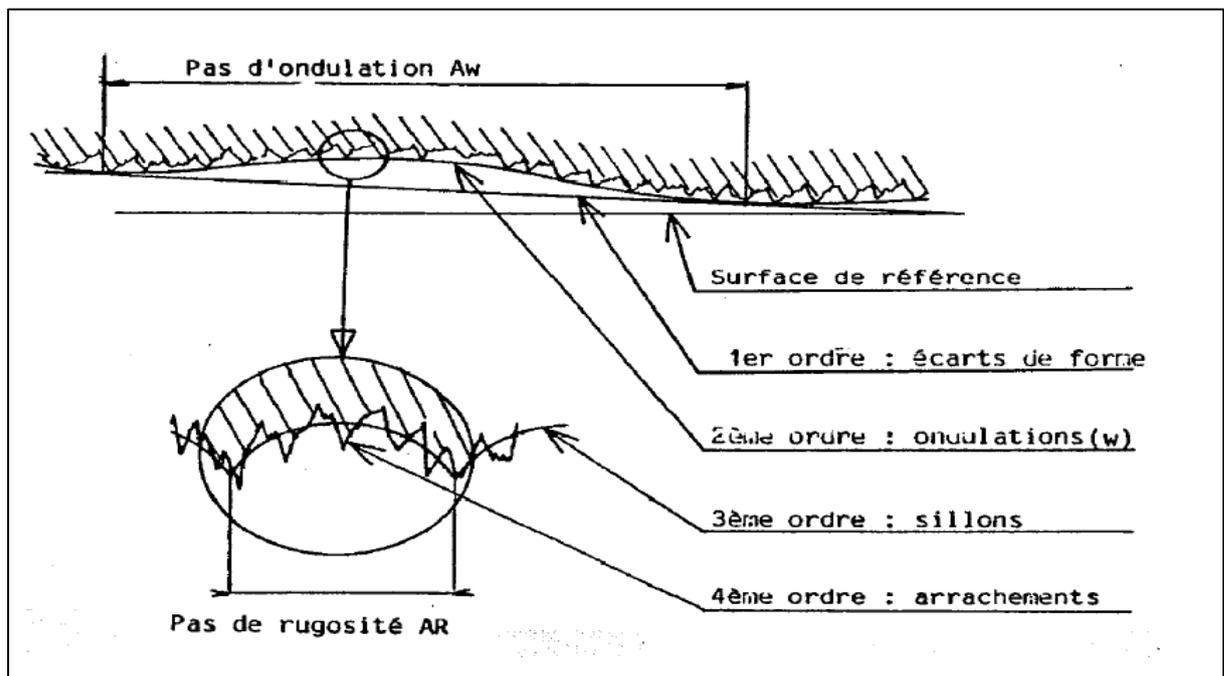


Figure I-5 Principaux défauts de surface.

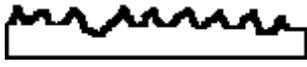
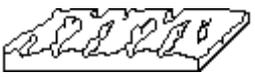
### I.3.4 Défauts de la rugosité :

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces

L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de roulement,
- la résistance au matage,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,

- la facilité d'accrochage des revêtements,
- la résistance aux efforts alternés (fatigue). [10]

	<i>Types de défauts</i>	<i>Désignation</i>	<i>Causes</i>
<i>Macrographiques</i>	 Profil géométrique	défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
		Ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
<i>Macrographiques</i>		strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
		arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

**Tableau I-1:** Différent type de défauts de rugosité [10].

#### I.4 Les efforts de coupe :

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double)

##### I.4.1 Définition et intérêt de leur mesure :

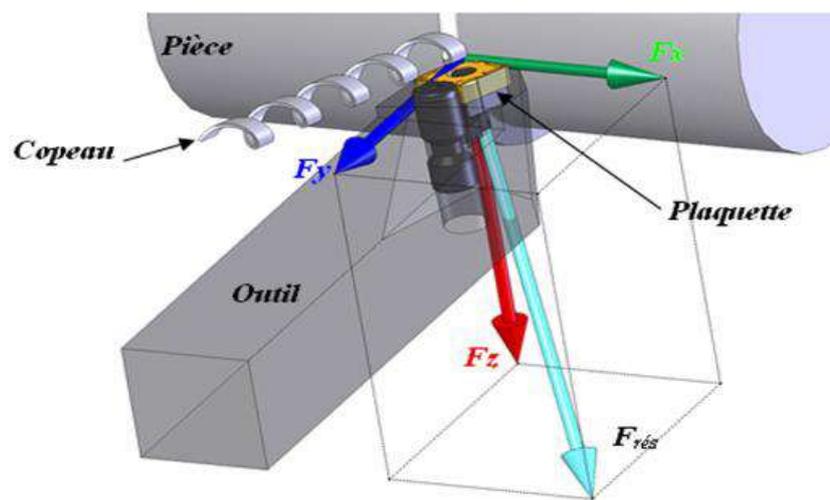
Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (**Figure I-6**).

- ❖  $F_z$  : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- ❖  $F_x$  : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- ❖  $F_y$  : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

L'effort global de coupe  $F$  peut donc être défini par l'équation suivante :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \dots \dots \dots \text{I-1}$$



**Figure I-6** Les composantes de l'effort de coupe.

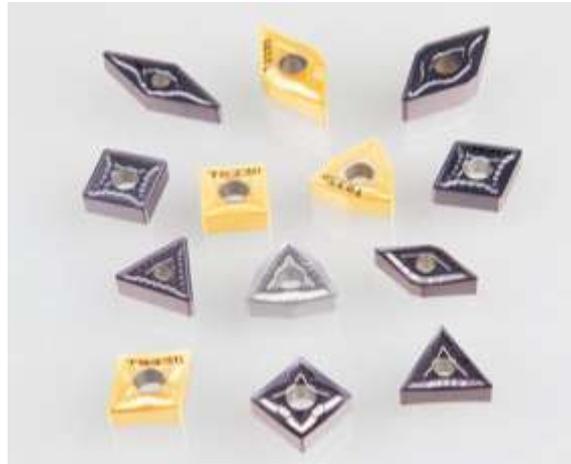
## I.5 Les matériaux de coupe :

### I.5.1 Introduction :

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) **Figure I-7** et d'autre part

des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces. [11]

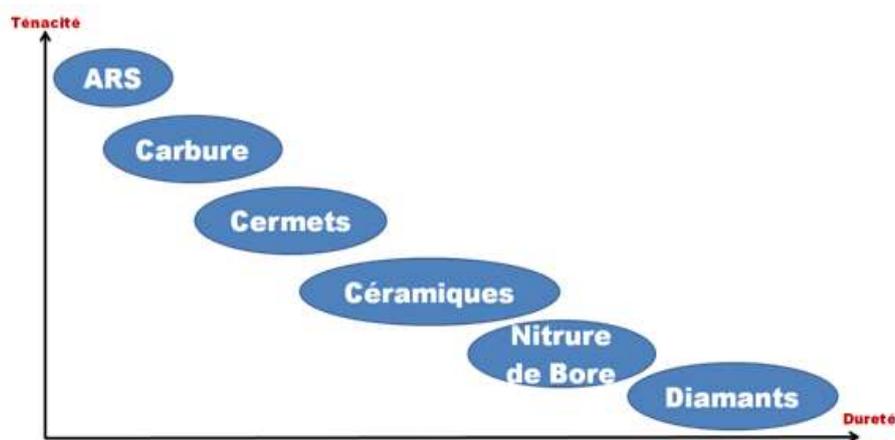


**Figure I-7:** Matériaux de coupe.

### I.5.2 Classification des matériaux des outils de coupe :

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (**Figure I-8**). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes : [10]

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation
- Ténacité : résistance à la rupture
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière à usiné
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion
- Résistance aux variations thermiques brusques.



**Figure I-8:** Classification Matériaux de coupe.

**✓ Les Aciers rapides :**

Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7% de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures.

- ✓ Dans tous les cas environ 4 % de chrome(C).
- ✓ Du tungstène(W), du molybdène(D), du vanadium(V), en proportions variables.
- ✓ Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NF A35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

**✓ Carbure :**

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on fixe sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide.

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.

Composition : Noyau en carbure de tungstène ( $T^{\circ}$  de fusion 2600°).

Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°).

Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon :  $Al_2O_3$ ).

**✓ Cermets :**

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitrure de Titane ou de nitrure de Titane.

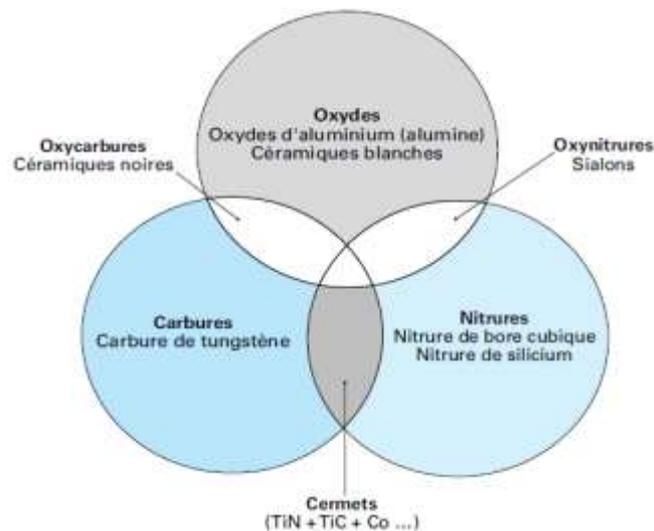
Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

**✓ Céramiques :**

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium (**Figure I-9**).

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).



**Figure I-9:** Les Céramiques.

#### ✓ Nitrure de Bore Cubique (CBN) :

Le CBN (**Figure I-10**) offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert :

- Une machine stable.
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce.
- Un arrosage.



**Figure I-10:** Plaquette CBN.

### ✓ Diamant :

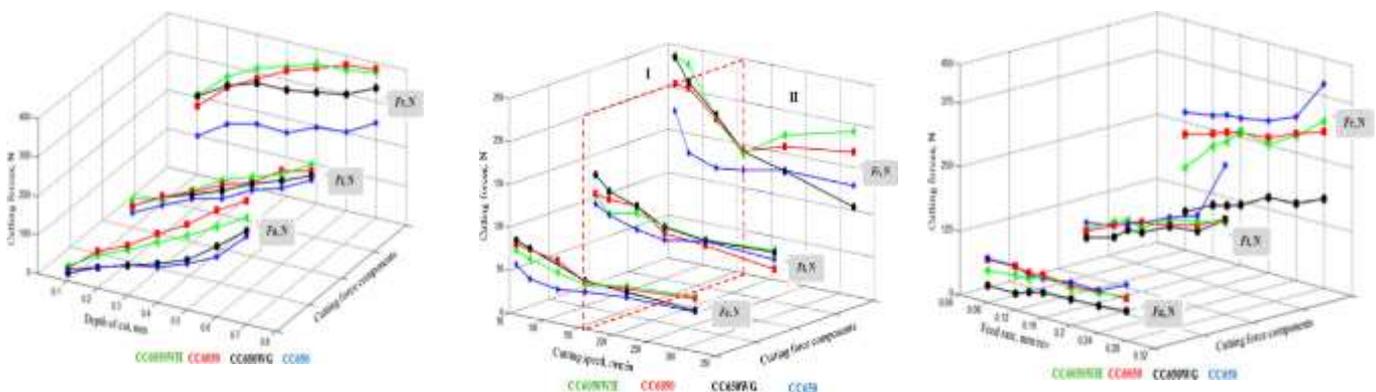
L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermo durcissable [12].

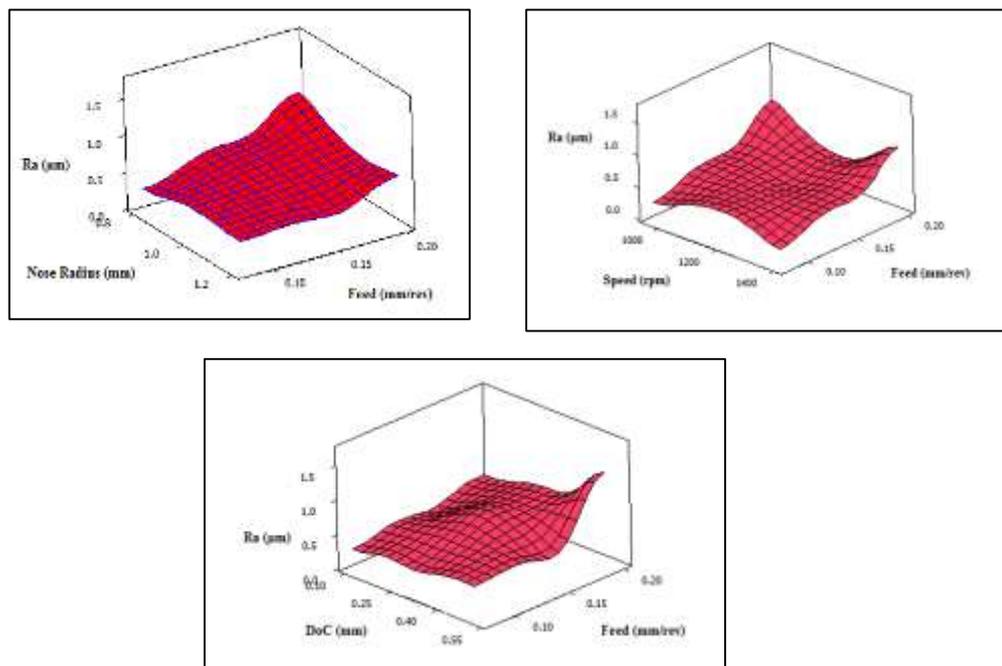
## I.6 Etat de l'art sur l'usinage des pièces dures :

[AOU 16] et autres ont décrit une comparaison entre les outils de coupe en céramique Wiper (multi rayons) et conventionnels en termes des efforts de coupe et l'usure en dépouille lors du tournage dur de l'acier AISI 4140 durcis (60 HRC), utilisant la méthodologie de surface de réponse. Dans ce cadre, plusieurs expériences d'usinage basées sur des conceptions d'expériences factorielles à trois facteurs (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) à trois niveaux, complétées par une analyse statistique de la variance (ANOVA) ont été réalisées. L'analyse paramétrique montre que les céramiques non revêtues (Wiper CC650WG et CC650 conventionnelle) donnent des faibles efforts de coupe par rapport aux céramiques revêtues (Wiper CC6050WH et CC650 conventionnelles). Par contre, les outils de coupe en céramique Wiper (CC6050WH et CC650WG) sont plus performants par rapport à céramiques conventionnelles (CC6050 et CC650), en termes d'usure en dépouille.



**Figure I-11:** Effet de la ( $V_c, f$  et  $a_p$ ) sur les efforts de coupe pour les quatre nuances (CC6050WH, CC6050, CC650WG, et CC650) [AOU 16].

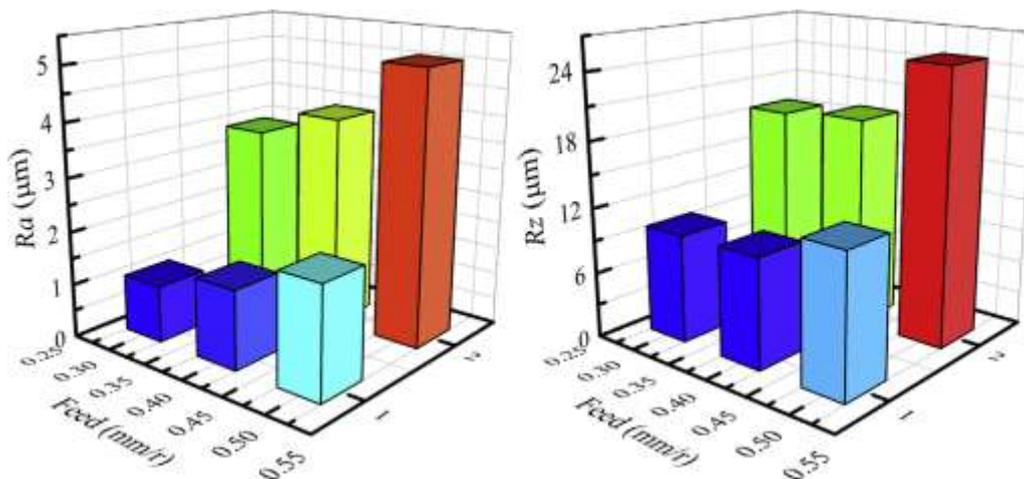
[Add 15] et autres ont étudié les performances des plaquettes Wiper lors du tournage dur de l'acier trempé par rapport aux plaquettes conventionnelles en termes d'état de surface. L'influence de paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe et le rayon du bec de l'outil (pour les Wiper et les inserts conventionnelles) sur la rugosité de la surface est analysée à l'aide des analyses de variance (ANOVA) et des moyennes (AOM). L'analyse montre clairement que les plaquettes de Wiper produisent un très bon état de surface usinée par rapport aux plaquettes conventionnelles.



**Figure I-12:** Evolution de la rugosité Ra en fonction Vc, f, r et ap. [Add 15].

[PEI 16] et autre ont étudié, les topographies de surface lors du tournage de finition avec les plaquettes conventionnelles et wiper. L'élément clé de ce travail est que l'équation de la trajectoire de l'arrête de coupe dans le système de coordonnées de l'outil de coupe est transformée en système de coordonnées de la machine-outil et de la pièce à usiner par l'utilisation de la transformation de coordonnées spatiales. Ensuite, un algorithme de simulation de la topographie de surface basé sur l'équation du chemin d'arrête de coupe et les paramètres de coupe est proposé. Le résultat de ce travail est que la topographie et le profil de rugosité de surface simulés concordent bien avec les résultats expérimentaux. Les résultats de surface simulés et réels montrent qu'une meilleure topographie de surface est obtenue lors du tournage de finition avec la plaquette Wiper par rapport à la plaquette conventionnelle. L'effet

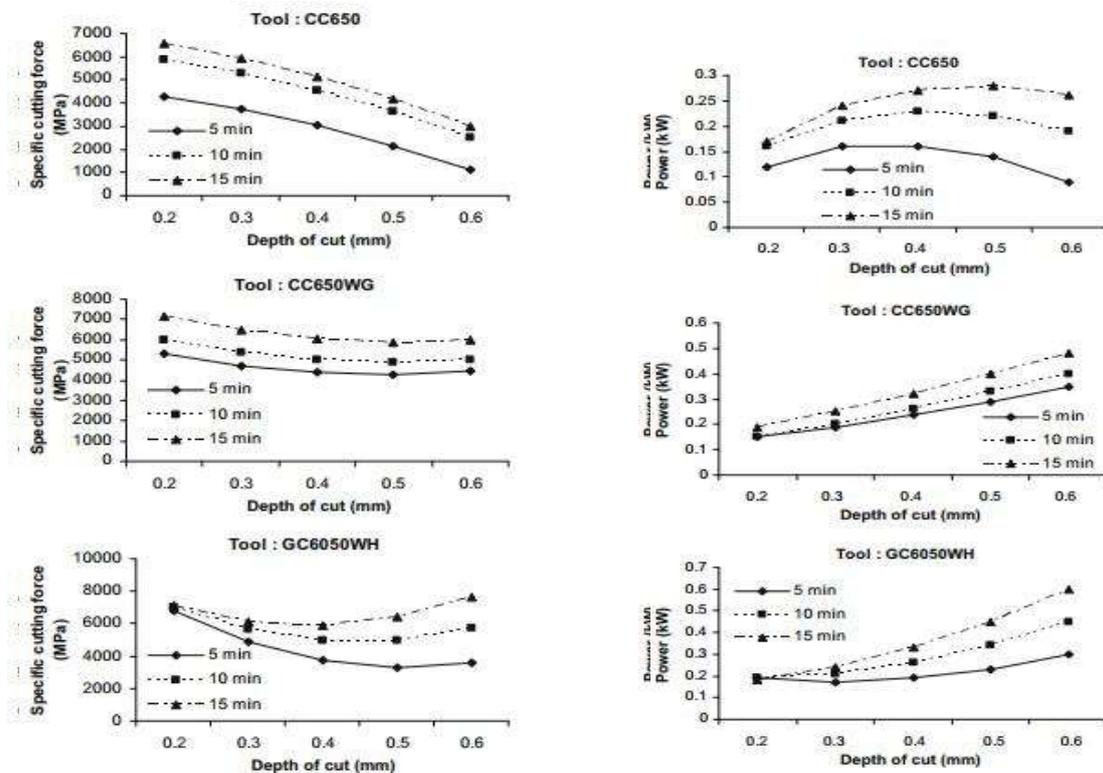
de polissage de la plaquette Wiper conduit à une demi-diminution du Ra et du Rz. Les profils de surface réels ne sont plus des formes d'ondes régulières en raison de l'effet de labour et du flux latéral existant dans la zone de coupe. En outre, une carte de rugosité de surface a également été développée pour optimiser la sélection du rayon et du taux d'alimentation des Wiper afin de répondre aux besoins de finition de surface avec une productivité supérieure. Du point de vue de la conception des outils de coupe, le rayon de Wiper cinq fois plus grand que le rayon de la pointe de l'outil peut pleinement jouer son rôle. Ceci fournit un nouvel aperçu de la conception de l'insert Wiper par rapport aux techniques conventionnelles. Surtout, le modèle proposé donne une meilleure prédiction de la rugosité de surface dans le processus de tournage de finition par rapport aux modèles empiriques et de la rugosité de régression précédents. La prévision de la rugosité de surface lors du tournage de finition avec une plaquette Wiper est également réalisée.



**Figure I-13:** Comparaison de Ra and Rz en tournage avec des plaquettes conventionnelles et Wiper [PEI 16].

[GAI 08] et autre et autres ont étudié les caractéristiques de l'usinabilité de l'acier d'outil pour travail à froid à haute teneur en chrome AISI D2 en tournage avec les plaquettes en céramique (CC650, Wiper CC650WG et Wiper GC6050WH). Une tentative a été faite pour analyser les effets de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité tels que l'effort de coupe spécifique, la force d'usinage, la puissance, la rugosité de surface et l'usure de l'outil en utilisant les modèles mathématiques du deuxième degré. La planification des expériences a été faite par un plan factoriel complet (FFD). D'après l'analyse paramétrique,

il s'est avéré que la plaquette Wiper CC650WG est plus performante en termes de la rugosité de surface et de l'usure de l'outil (**Figure I-14**).



**Figure I-14:** Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la puissance et la pression.

[PAI 11] et autres présentent une étude expérimentale lors du tournage de l'acier trempé AISI 52100 avec des inserts en céramique mélangée à un Wiper ( $Al_2O_3 + TiC$ ) revêtus de TiN, en utilisant la conception à plusieurs variables robustes (MRPD). La principale caractéristique de cette nouvelle approche d'optimisation consiste à prendre en compte les variables contrôlables ( $x_i$ ) et de bruit ( $z_i$ ) du processus de tournage difficile pour déterminer les niveaux de paramètres minimisant la distance entre chaque réponse ( $y_i$ ) et ses cibles respectives ( $T_i$ ), tout en conservant chaque variance causée par les variables de bruit aussi faible que possible. En utilisant un réseau croisé, une conception de surface de réponse formée par la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ) et la profondeur de coupe ( $d$ ) est soumise à l'influence de quatre scénarios construits avec une conception factorielle complète à 22 facteurs de bruit - pièce diminution de la dureté ( $Z_1$ ) et usure du flanc de l'outil ( $Z_2$ ). Cette disposition expérimentale permet de générer une moyenne, une variance et une erreur

quadratique moyenne (MSE) de cinq paramètres de rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_t$  et  $R_q$ ). Comme ces réponses sont fortement corrélées, pour extraire et utiliser ces informations, une analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée. En adoptant l'erreur multi-variée moyenne quadratique (MMSE) comme critère d'optimisation, une solution robuste pourrait être trouvée. Les résultats théoriques et expérimentaux étaient convergents et confirmés. Avec  $V_c = 199,9$  m / min,  $f = 0,191$  mm / tour et  $d = 0,190$  mm, les cinq paramètres de rugosité de surface et les variances respectives étaient minimales, avec de meilleurs résultats que ceux obtenus avec optimisation individuelle.

[GUN 13] et autres s'intéressent sur l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et la dureté) par la méthode de Taguchi pour déterminer la rugosité de la surface ( $R_a$ ) optimale, lors du tournage dur de la fonte blanche martensitique (Ni-Dur) à deux différents niveaux de dureté (50 et 62 HRC) avec l'outil CBN et céramique revêtue. Ils ont constaté que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface pour la fonte (Ni-Dur) avec la 62 HRC (Figure I-15), tandis que la vitesse de coupe est le facteur le plus significatif qui influence la rugosité de la surface pour la même matière avec la dureté 50 HRC (Figure I-15).

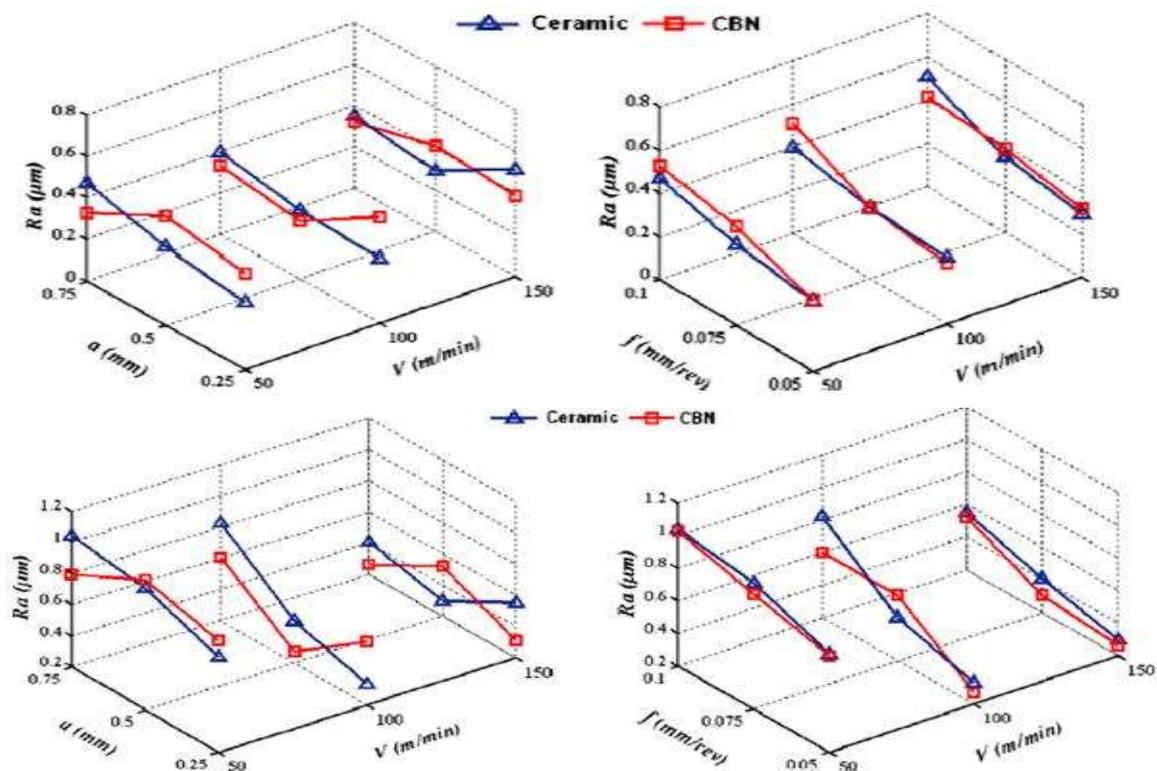


Figure I-15 Influence des paramètres de coupe sur  $R_a$  pour la fonte blanche.

## *Chapitre II*

---

# *Procédure et équipements d'expérience*

---

## II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés et qui servent au suivi de l'évolution de l'effort de coupe générée et de la rugosité de surfaces obtenue lors des essais. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la réalisation des expériences ainsi que le choix des plans d'expériences.

Les essais d'usinages sur l'acier 100Cr6, ont été effectués au département de Génie mécanique et au laboratoire de mécanique et structure à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

## II.2 Equipements utilisés :

### II.2.1 Machine-outil :

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40C (**Figure II-1**) il possède une puissance sur la broche égale à 6.6KW, les fréquences de rotation disponibles suivantes : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min et les avances disponibles sur le tour sont comme suit: (0,08; 0,12; 0,16; 0,20) mm/tr.



**Figure II-1:** Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

## II.2.2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage :

Le matériau sur lequel ont été testées nos plaquettes présente des caractéristiques voisines des matériaux que l'on usine le plus souvent dans l'industrie.

La nuance de l'acier choisie est :

- L'acier à roulement 100Cr6, connu aussi par la dénomination AISI 52100.

Le 100Cr6 est un acier très résistant à l'usure. Il est l'un des aciers les plus produits dans l'utilisation et la fabrication des billes, rouleaux, bagues, cages de roulement. On l'emploie également pour l'usinage à froid comme matrice de formage. [1].

Pour nos essais, nous avons usiné des éprouvettes de diamètre  $D = 60$  mm et de longueur  $L=400$  mm (**Figure II-2**).



**Figure II-2:** éprouvette utilisée.

La composition chimique de l'acier 100Cr6 est représentée dans le (**Tableau II-1**) :

Eléments chimiques	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
Pourcentage(%)	1.05	0.38	0.21	0.03	0.028	1.41	0.21

**Tableau II-1:** Composition chimique de l'acier 100Cr6.

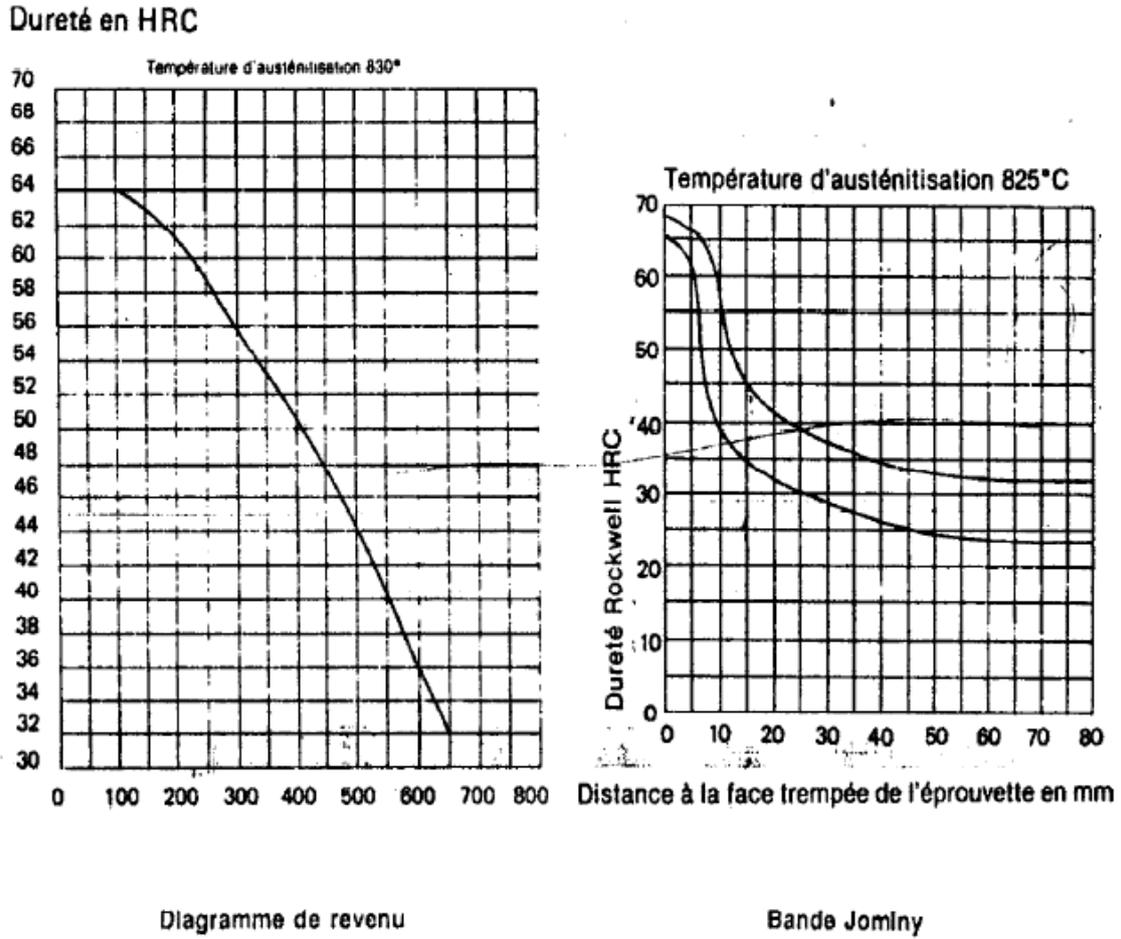
## II.2.3 Traitement thermique des éprouvettes :

### II.2.3.1 Conditions du traitement thermique :

Pour le traitement thermique de notre éprouvette, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté de 60HRC (**Tableau II-2**). Les courbes tracées sur la (**Figure II-3**) ont permis de déterminer la section des éprouvettes de manière à garder une dureté constante et la température de revenu.

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement Thermique	
			Trempe à T	revenu à T
100Cr6	285 HB	60HRC	= 850 C°	= 240C°

**Tableau II-2:** Conditions du traitement thermique de l'acier utilisé.



**Figure II-3:** Diagramme de revenu et bande de Jominy de l'acier 100Cr6.

Les traitements thermiques de l'éprouvette ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (**Figure II.4**). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le (**Tableau II-3**).



**Figure II-4:** Four à chambre électrique pour le traitement thermique d'éprouvette.

Marque	Dimensions (mm)			Puissance (KW)	T°C max
	Largeur (B)	Longueur (L)	Hauteur (H)		
B180	330	500	280	14	1200 °C

**Tableau II-3:** Caractéristiques du four électrique.

Les opérations de traitement thermique que nous avons réalisé sur les éprouvettes sont :

- a) Chauffage des éprouvettes.
- b) Transport de la pièce.
- c) Trempe à l'huile.

## II.2.4 Outils de coupe utilisés :

### II.2.4.1 Porte plaquette :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride et par trou central (**Figure II-5**). La géométrie de porte outil est donnée sur le (**Tableau II-4**). La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protégée le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

Port outil	Marque	$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$	$\chi r^\circ$	$\lambda^\circ$
PCLNR 25×25 M12	P MAX	6	-6	95	-6

**Tableau II-4:** Caractéristiques géométriques de porte-outils.



**Figure II-5:** Porte-outils utilisés.

### II.2.4.2 Plaquettes de coupe :

Le matériau des plaquettes de coupe utilisées est la céramique avec et sans revêtement. Ces plaquettes sont amovibles de forme :

- Rhombique d'une géométrie Wiper et non Wiper, comportant 4 arêtes de coupe par plaquette et sont de marque SANDVIK, avec une fixation par trou central.

Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le (Tableau II-5) et montées à la (Figure II-5).

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Composition
Céramique CC650	CC650 SANDVIK	CNGA 12 04 12 T 010 20	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC)
Céramique WiperCC650	CC650WG SANDVIK	CNGA 12 04 12 T 010 20WG	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC)

**Tableau II-5:** Informations relatives aux matériaux de coupe utilisés.

#### Céramique CC650 :

Nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane, principalement recommandée pour l'usinage de finition des aciers trempés (70% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30% TiC). Des fontes et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

#### Géométrie Wiper :

Les plaquettes céramiques s'utilisent notamment pour la finition des surfaces selon des spécifications très élevées. Sandvik couramment a adapté sa technologie Wiper mondialement réputée aux plaquettes en matériaux de haute technologie afin d'améliorer considérablement la productivité de ce type d'opération.

— **WG** : géométrie Wiper pour usinage générale convient bien pour la finition des fontes grise autorise des avances élevées;

Descriptif des plaquettes **CNGA 12 04 12 T 010 20** ;

— C : Indique la forme de la plaquette (ici rhombique) ;

— N: Valeur de l'angle de dépouille ;

— G: Tolérances dimensionnelles ;

- A: Type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil ;
- 12: Indication de la longueur d'arête de coupe;
- 04: Indication de l'épaisseur de la plaquette;
- 12: Rayon du bec de l'outil ici égal à 1,2 mm;
- T: Chanfrein avec honing (léger arrondi d'arête);
- 010: la largeur du chanfrein;
- 20: l'angle du chanfrein;



**Figure II-6:** plaquettes de coupe utilisée.

## II.2.5 Equipement de mesure :

### II.2.5.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :

Pour la mesure du critère de rugosité ( $R_a$ ) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo), Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4mm avec une longueur de base de 0,8mm (0,8X5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0,05 à  $40\mu\text{m}$ ) pour  $R_a$  et de (0,3 à  $160\mu\text{m}$ ) pour  $R_t$  et  $R_z$ . Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce (**Figure II-7**).

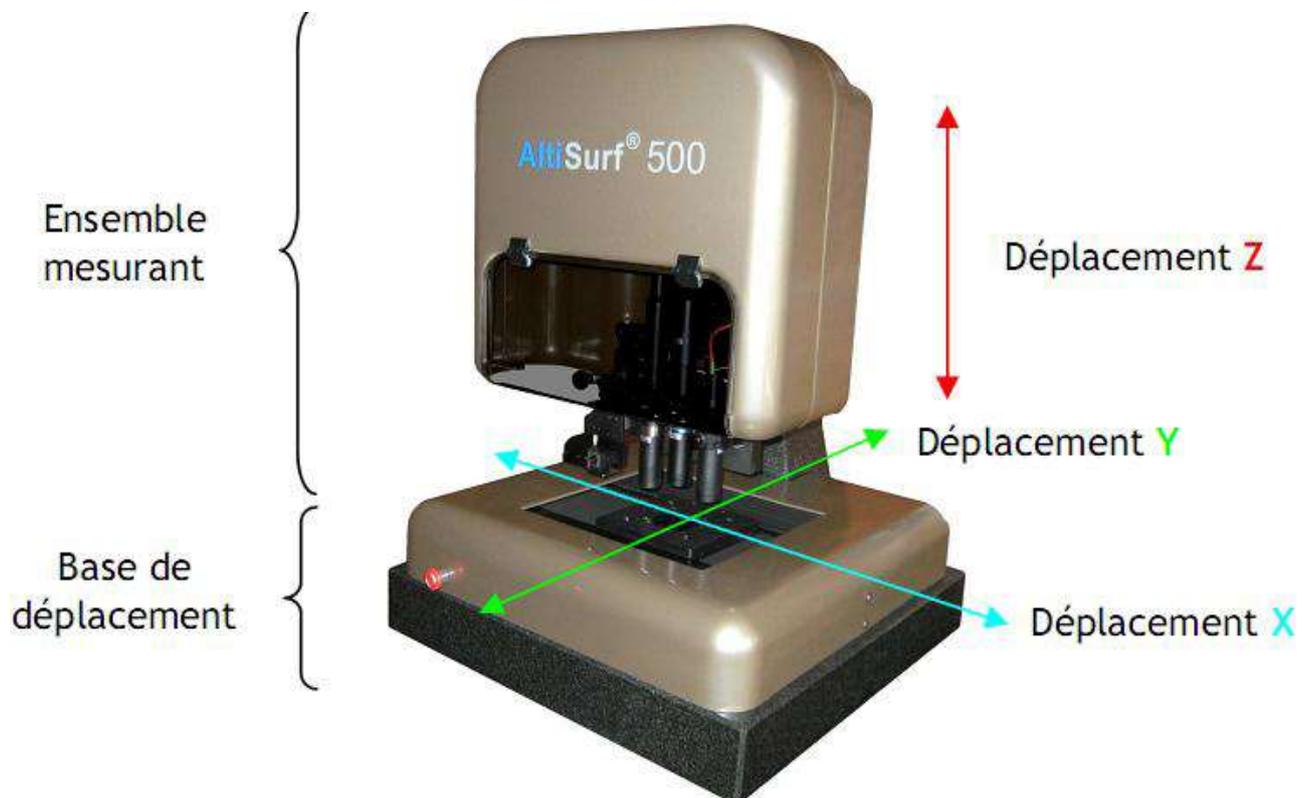


**Figure II-7:** Mesure de rugosité sans démontage de la pièce  
Unité d'affichage.

## II.2.5.2 Station AltiSurf pour la mesure la rugosité en 3D :

### II.2.5.2.1 Présentation :

L'appareil de métrologie optique AltiSurf permet de finement étudier la topographie de surface des échantillons d'essai. De ce fait, la technologie AltiSurf représente un outil performant dans l'établissement de relations entre les états de surface, micro dimensions, revêtements... et la fonctionnalité et qualités attendues d'un produit (**Figure II-8**).



**Figure II-8:** Station AltiSurf® 500.

Une station AltiSurf® 500 standard est composée (**Figure II-8**):

- d'une base en granite ;
- d'un ensemble inférieur ou base de déplacement : plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs ;
- une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- d'un ensemble supérieur ou ensemble mesurant : une table de déplacement motorisée de haute un support multipositions accueil les différents capteurs AltiProbe optique, inductif, micro force, laser. La modularité de la station AltiSurf permet à tout moment à l'utilisateur d'utiliser l'un ou l'autre des capteurs disponibles ;

#### **II.2.5.2.2 Vue d'ensemble :**

La chaîne de mesure de la rugosité en 3D (**Figure II-9**) est composé de :

##### **a) Boîtier de contrôle Phénix :**

Le boîtier de contrôle phénix est l'interface entre l'intelligence située dans le PC industriel et l'AltiSurf. Il contient les alimentations et l'électronique de puissance associée aux axes de déplacement, la connectique et la mise en forme des signaux capteurs, et le cas échéant le conditionneur du capteur inductif.

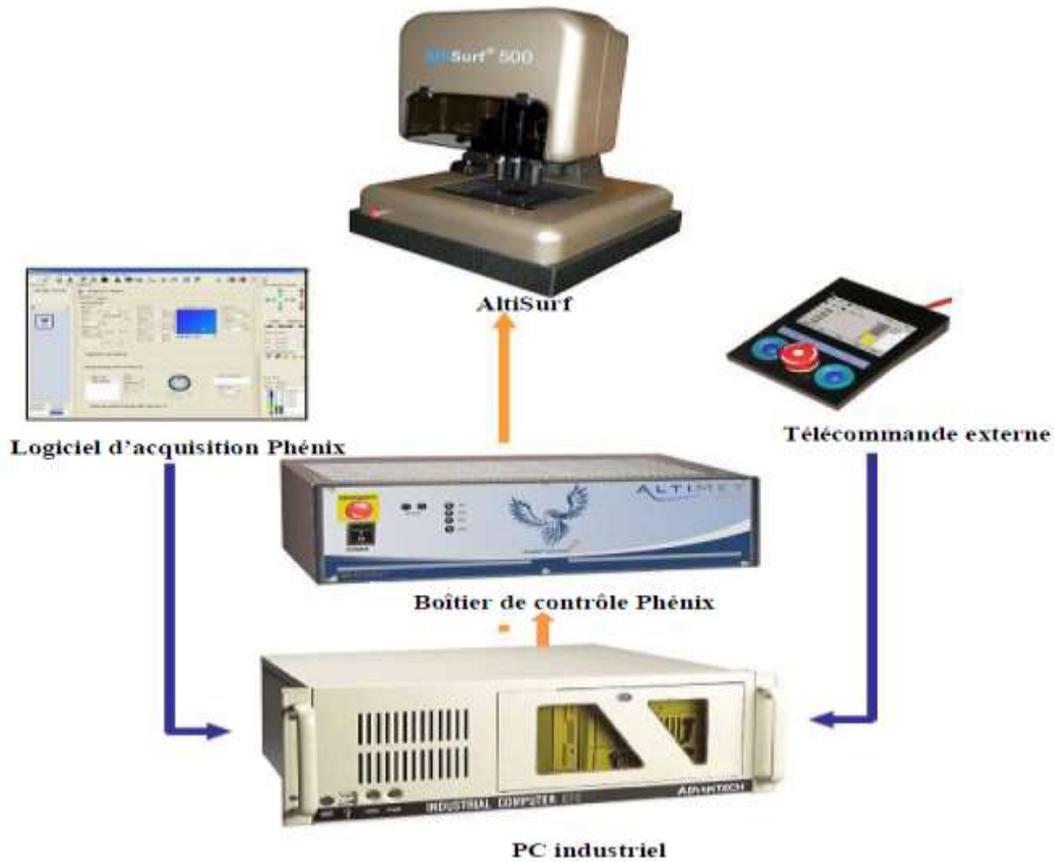
##### **b) Télécommande externe :**

La télécommande externe est connectée à la station, elle permet de déplacer les axes et de paramétrer une mesure sans se trouver devant l'écran principal.

Elle dispose de 2 joysticks, de 5 touches de fonction, d'un écran tactile et d'un bouton d'arrêt d'urgence qui stoppe tout mouvement sur l'ensemble des axes.

##### **c) Logiciel d'acquisition Phénix :**

Le logiciel Phénix est l'interface utilisateur de l'AltiSurf, il permet de configurer l'ensemble des paramètres, de programmer et d'exécuter des mesures. Il se décompose en une partie graphique et une partie serveur qui dialogue en permanence avec le matériel et fait appel à différentes cartes placées dans le PC industriel.



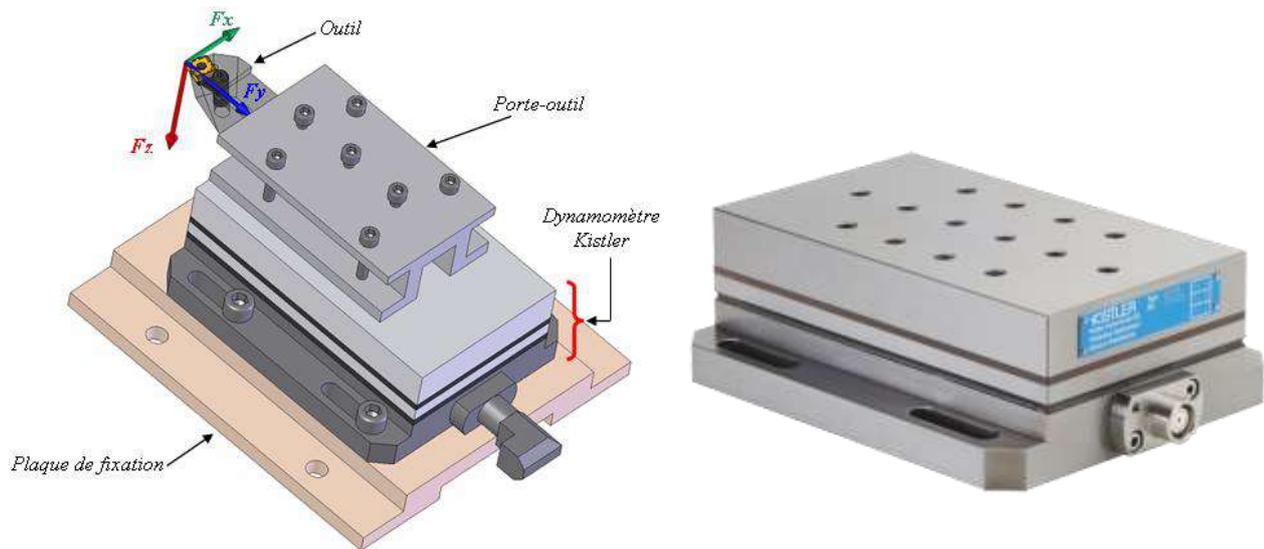
**Figure II-9.**Chaîne de mesure de la rugosité en 3D

#### d) Logiciel d'analyse Altimap :

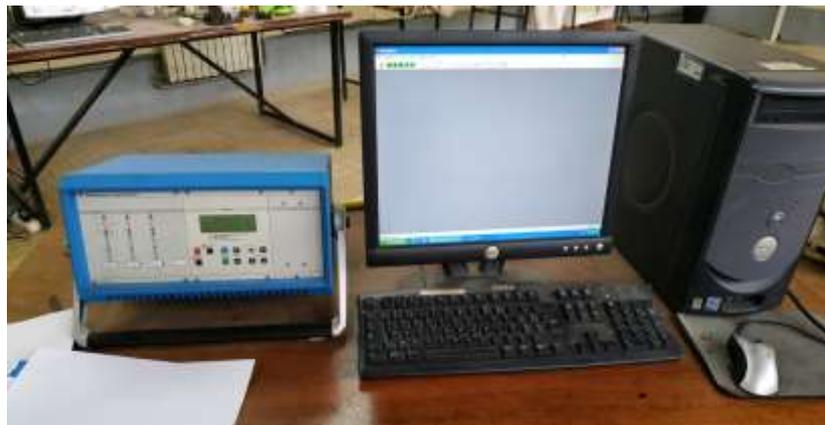
AltiMap est le logiciel utilisé par défaut pour l'analyse des mesures acquises par Phénix, une aide en ligne est disponible directement dans AltiMap.

#### II.2.5.3 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :

Afin de mesurer les efforts de coupe en temps réel, nous avons utilisé une plateforme (KISTLER). Elle est considérée parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite : le dynamomètre, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes. Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil reçoit le mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure, car elle est constituée de quatre capteurs en quartz (**FigureII-10**).



**Figure II-10:** Plateforme KISTLER.



**Figure II-11:** Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.

### II.3 Autres équipements utilisés

- Une appareil photo numérique pour prendre les photos.
- Une pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce.

### II.4 Conditions de coupe :

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes (**Tableau II-6**).

## II.5 Planification des expériences :

### II.5.1 Méthode unifactorielle :

On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur  $X$  sur un paramètre  $Y$ . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné  $X$  [ $X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$ ], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tableau II-6). Pour chaque  $X = X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ , ( $i = 1 \div N$ ). Pour étudier la rugosité 3D on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation  $Y = f(X)$ . Dans ce cas, on varie seulement le facteur  $X$ , tout en maintenant les autres facteurs constants. Des exemples de cette méthode se trouvent au chapitre III .

Ce type d'approche est coûteux, mais il est plus facile et le plus usuel en cas d'un nombre réduit des variables.

### II.5.2 Méthode multifactorielle :

Nous nous servons des plans d'expérience pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 10). C'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- ❖ Etablissement du but et des objectifs des essais ;
- ❖ Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- ❖ Choix du type de plan d'expérience ;
- ❖ Conduite des essais ;
- ❖ Détermination des facteurs influents ;
- ❖ Modélisation des réponses ;
- ❖ Recherche des paramètres optimaux ;
- ❖ Validation des résultats.
- ❖ Diminution Du Nombre Des Essais, Donc Du Coût Des Essais ;
- ❖ Détection Des Interactions Entre Les Facteurs ;
- ❖ Détection Des Conditions Optimales ;
- ❖ Meilleure Précision Des Résultats ;

### ❖ Modélisation Des Résultats.

La différence capitale entre la méthode d'un facteur à la fois et la méthode des plans d'expérience tient au fait qu'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience. Des exemples d'utilisation, de modélisation et d'optimisation par plans d'expérience se trouvent au chapitre III de notre thèse.

#### II.5.3 Méthode de Taguchi :

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée « Méthode Taguchi » qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à réaliser pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut s'avérer complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d'expériences [14]. Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées, et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [15].

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc(m/min)	190	f (mm/tr)	0,08 ; 0,2
ap(mm)	0.2		

**Tableau II-6:** Conditions de coupe pour les essais de la rugosité.

Conditions de coupe	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
		150 ; 190 ; 300 ; 380	0,08 ; 0,12 ; 0,16 ; 0,2

**Tableau II-7:** Conditions de coupe pour matrice de Taguchi (L<sub>16</sub>).

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X1	X2	X3
1	1	2	2
2	1	3	3
3	1	4	4
4	2	1	2
5	2	2	1
6	2	3	4
7	2	4	3
8	3	1	3
9	3	2	4
10	3	3	1
11	3	4	2
12	4	1	4
13	4	2	3
14	4	3	2
15	4	4	1
16	1	2	2

**Tableau II-8:** Matrice de planification de Taguchi ( $L_{16}$ ).

# **Chapitre III**

---

## **Modélisation des paramètres de coupe par RMS et Taguchi**

---

### **III.1 Introduction :**

Ce chapitre est consacré à l'étude et l'analyse statistique des résultats afin de développer les modèles mathématiques des paramètres technologiques étudiés (efforts de coupe et la rugosité de surface) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec les outils céramiques en Wiper et conventionnel (CC650WG et CC650).

Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (MSR), nous avons utilisé des logiciels de statistique appelés « MINITAB18 » et « DESIGN EXPERT10 ».

L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, et aussi la contribution de chaque paramètre du régime de coupe sur la rugosité et les efforts de coupe.

### **III.2 Planification expérimentale :**

La planification de l'expérience joue un rôle très important en réalisant les expériences avec le moyen disponible. Le tableau de Taguchi a été choisi en raison du nombre minimum des essais expérimentaux demandés, il est plus efficace lors de l'emploi d'un grand nombre des facteurs variables que les plans factoriels complets. En plus, le tableau L16 a été choisi pour augmenter la précision de l'expérimentation [14]. Le tableau L16 se compose de 16 rangées (nombre des essais expérimentaux).

#### **III.2.1 Etapes de la méthodologie de surface de réponse :**

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend Cinq étapes [16]:

- 1) Définir les variables d'entrées indépendantes et les réponses de sorties désirées ;
- 2) Adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de la Méthodologie de surface de réponse (MSR) ;
- 4) Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) Déterminer la situation du modèle quadratique de MSR et de décider si le modèle de MSR a besoin des variables de dépistage ou non.

**III.2.2 Modèle de la réponse :**

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante  $Y$ , dite variable de réponse (effort de coupe et rugosité), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1 ; X_2 ; X_3$ , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée ( $Y$ ) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \dots\dots\dots \text{Équation III-1}$$

- $Y$  est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- $X_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ . C'est la valeur de la coordonnée du facteur  $i$  retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

Les variables codées  $X_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes [17]:

$$X_1 = \frac{Vc - Vc_0}{\Delta Vc} \dots\dots\dots \text{Équation III-2}$$

$$X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f} \dots\dots\dots \text{Équation III-3}$$

$$X_3 = \frac{ap - ap_0}{\Delta ap} \dots\dots\dots \text{Équation III-4}$$

Où  $X_1, X_2$  et  $X_3$  sont les valeurs codées des paramètres  $Vc, f$  et  $ap$  respectivement.  $Vc_0, f_0$  et  $ap_0$  au niveau zéro.  $\Delta Vc, \Delta f$  et  $\Delta ap$  sont les valeurs de  $Vc, f$ , et  $ap$ , respectivement.

- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

### III.2.3 Teste de validité des modèles :

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (*ANOVA*) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination  $R^2$  est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient  $R^2$  peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où  $R^2$  varie entre 0 et 1. Une valeur de  $R^2$  proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (**Équation III-5**) [18].

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \dots\dots\dots \text{Équation III-5}$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (**Équation III-6**) [18].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \dots\dots\dots \text{Équation III-6}$$

Où :  $y_{ij}$  : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

$\hat{y}_{ij}$  : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

Le traitement statistique des résultats des (**Tableau III-1**) et (**Tableau III-10**) ont été réalisés en deux phases. La première phase portait sur l'analyse de la variance et de l'effet des facteurs et des interactions. La deuxième phase a permis d'obtenir des modèles mathématiques des paramètres étudiés (régression quadratique).

### III.3 Plaquette en céramique conventionnel CC650 :

#### III.3.1 Résultats des expériences :

Le (tableau III-1) représente les valeurs mesurées du critère de la rugosité ( $R_a$ ) et les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) pour les plaquettes étudiées. Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 16 essais avec 3 facteurs à 4 niveaux.

$N^{\circ}$ <i>D'Essai</i>	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$R_a$ ( $\mu m$ )	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)
1	150	0,08	0,1	0,64	20,52	49,16	47,44
2	150	0,12	0,2	0,88	25,55	61,13	56,98
3	150	0,16	0,3	0,9	29,19	70,61	112,88
4	150	0,2	0,4	1,08	44,22	146,7	149,52
5	190	0,08	0,2	0,52	16,52	58,38	61,44
6	190	0,12	0,1	0,6	18,34	52,72	31,5
7	190	0,16	0,4	0,78	42,01	115,37	114,73
8	190	0,2	0,3	1,07	34,02	78,13	121,19
9	300	0,08	0,3	0,46	29,26	53,27	43,6
10	300	0,12	0,4	0,68	38,13	67,79	110,1
11	300	0,16	0,1	0,75	15,4	50,5	40,75
12	300	0,2	0,2	0,94	21,57	67,39	96,4
13	380	0,08	0,4	0,32	30,54	75,75	67,45
14	380	0,12	0,3	0,5	8,7	73,33	74,84
15	380	0,16	0,2	0,68	7,9	50,39	61,12
16	380	0,2	0,1	0,85	14,3	25,93	36,05

**Tableau III-1** Résultats de la rugosité et les efforts de coupes suivant  $L_{16}$  (plan de Taguchi).

### III.3.2 Modèle de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.3.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra :

Le (Tableau III-2) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité Ra :

CC650								
Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Remarque
<b>Modèle</b>	9	0,679403	94,51	0,679403	0,075489	11,48	0,004	<b>Significatif</b>
<b>Vc</b>	1	0,147768	20,56	0,059737	0,059737	9,09	0,024	<b>Significatif</b>
<b>f</b>	1	0,520031	72,34	0,191146	0,191146	29,08	0,002	<b>Significatif</b>
<b>ap</b>	1	0,000011	0,00	0,003545	0,003545	0,54	0,490	<b>N significatif</b>
<b>Vc*vc</b>	1	0,000303	0,04	0,000517	0,000517	0,08	0,789	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	0,000756	0,11	0,000756	0,000756	0,12	0,746	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	0,003906	0,54	0,003906	0,003906	0,59	0,470	<b>N significatif</b>
<b>Vc*f</b>	1	0,003396	0,47	0,004903	0,004903	0,75	0,421	<b>N significatif</b>
<b>Vc*ap</b>	1	0,002329	0,32	0,002329	0,002329	0,35	0,573	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	0,000901	0,13	0,000901	0,000901	0,14	0,724	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	0,039441	5,49	0,039441	0,006574			
<b>Total</b>	15	0,718844	100					

**Tableau III-2:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra

Les résultats présentés dans le (Tableau III-2) sont analysés par le logiciel MINITAB 18. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha=0.05$ ). L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité de surface (Ra) pour la plaquette CC650 montre que l'avance (f) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 72,34% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 20,56% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante.

#### III.3.2.2 Graphique des effets principaux et diagramme d'interaction :

La figure (III-1), présente les effets principaux des facteurs considérés : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe sur la rugosité de surface Ra.

Nous remarquons que l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) sont les facteurs les plus influents sur la rugosité (Ra), car ils ont la plus grande pente. La profondeur de passe (ap) affecte peu sur la rugosité (Ra).

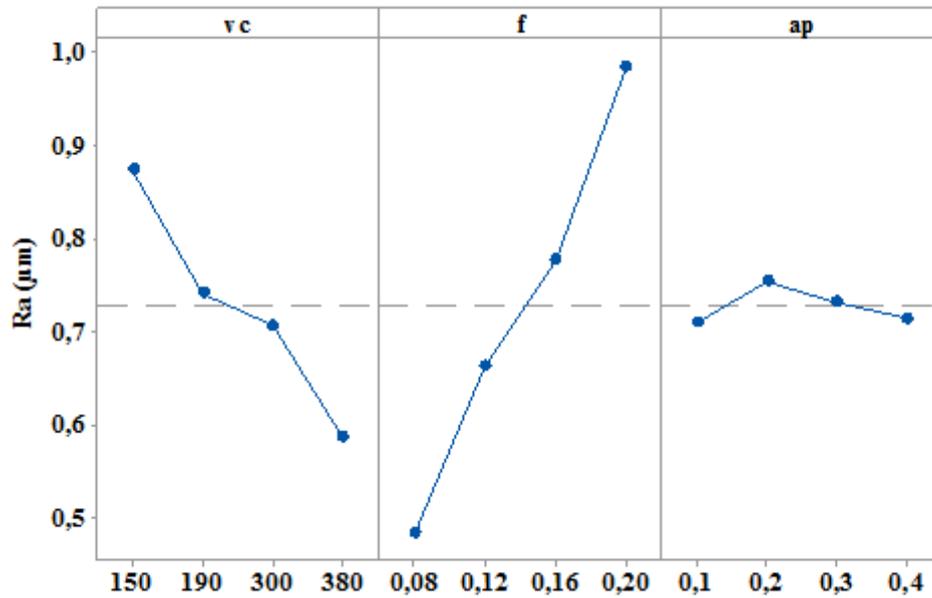


Figure III-1 : Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur la rugosité Ra.

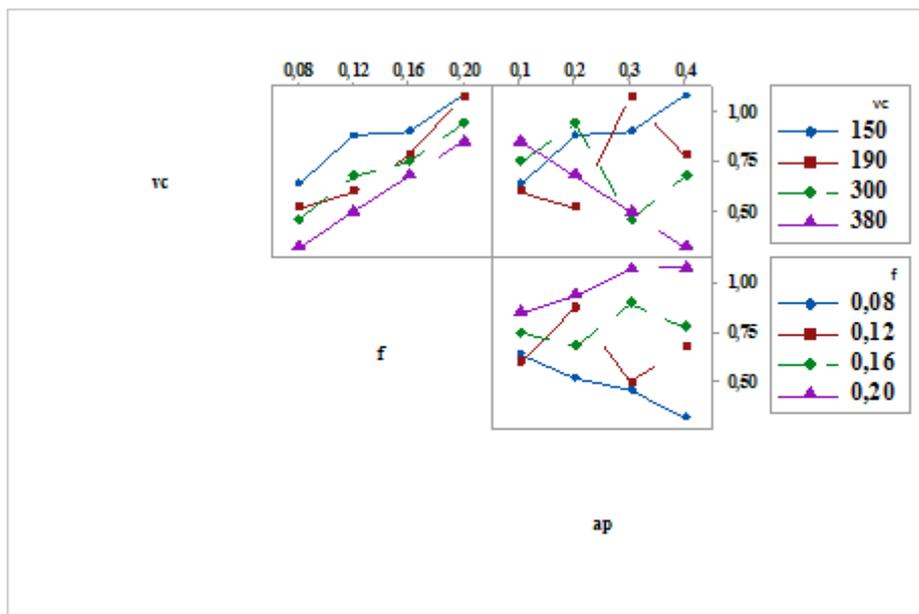


Figure III-2: Diagramme d'interaction pour Ra.

La figure (III-2) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (Vc) et l'avance(f) ; entre la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ; entre la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap).

### III.3.2.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

L'analyse de graphe de Pareto (**Figure III-3**) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur le facteur étudié. Le diagramme de Pareto classe par ordre décroissants l'importance des paramètres et leurs interactions sur les facteurs de la rugosité.

Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est l'avance (f) par tour suivie de la vitesse de coupe (Vc). La profondeur de passe (ap) n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité Ra.

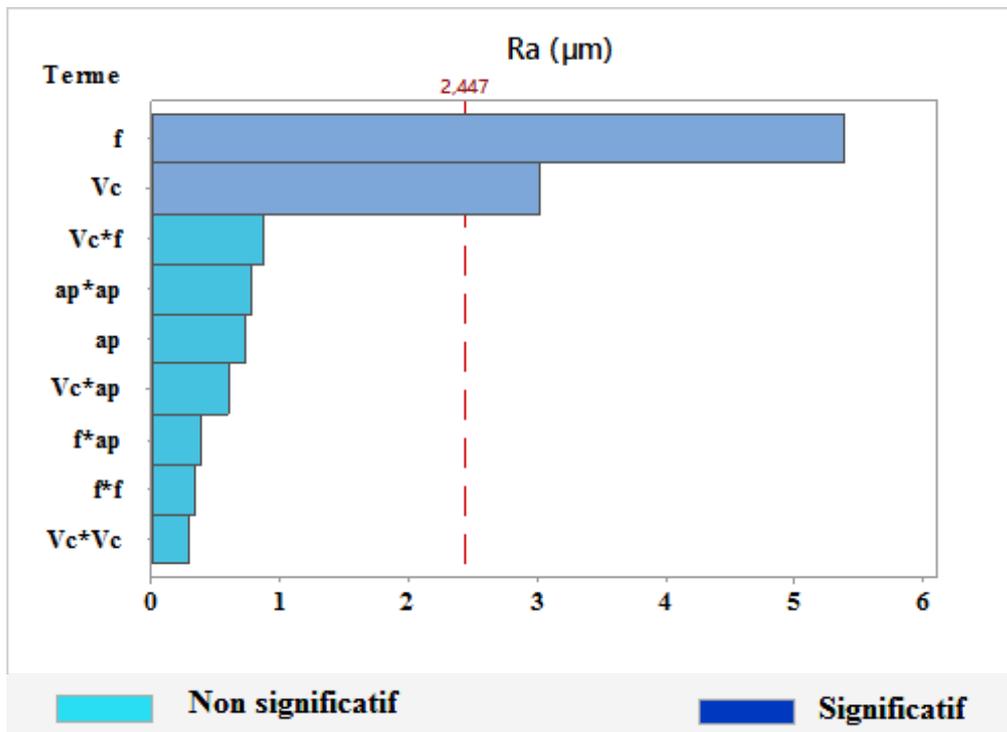


Figure III-3: Graphe de PARETO de la rugosité Ra.

### III.3.2.4 Analyse de régression (Ra) en fonction de (Vc ; f et ap) :

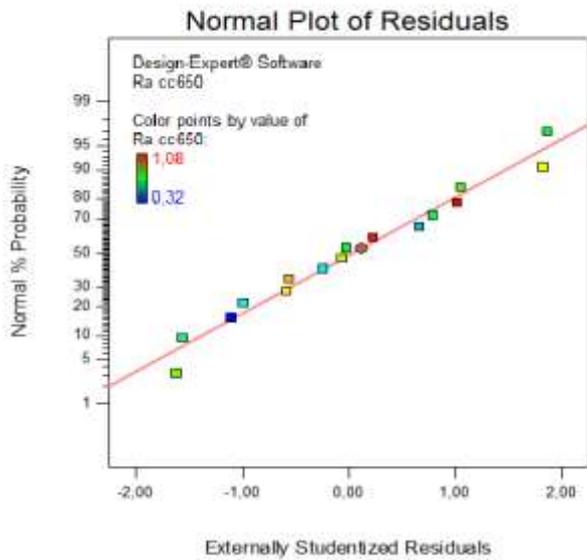
Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun des critères de rugosité et les éléments du régime de coupe, Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité,

Equation de régression :

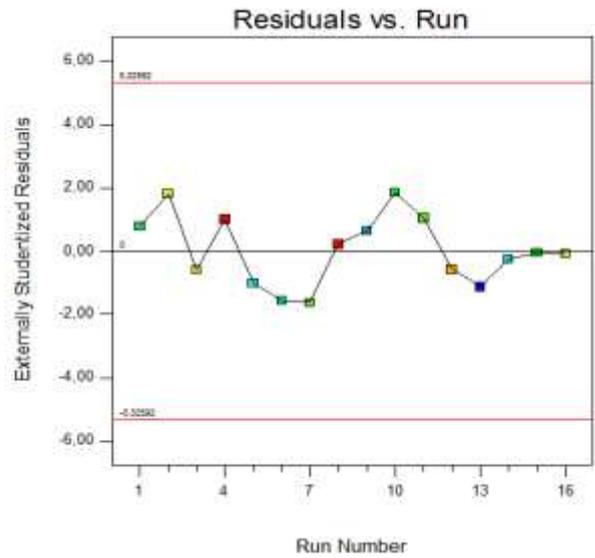
$$\mathbf{Ra}_{cc650} = 0,743 - 0,00341 Vc + 1,89 f + 0,83 ap + 0,000001 Vc*Vc + 4,3 f*f - 1,56 ap*ap + 0,00782 Vc*f + 0,00216 Vc*ap - 2,64 f*ap.$$

$$\mathbf{R}^2_{cc650} = 94,51\%, \quad \mathbf{Adj R}^2_{cc650} = 86,28\%, \quad \mathbf{Pred R}^2_{cc650} = 58,47\%.$$

**III.3.2.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**



**Figure III-4:** courbe de normalité pour Ra.

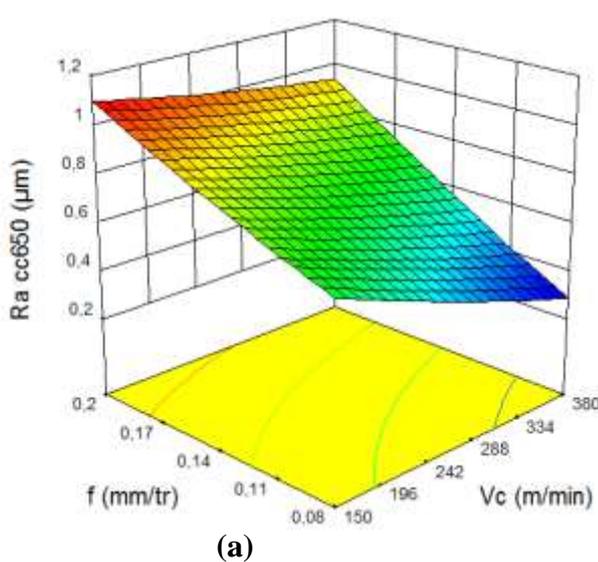


**Figure III-5 :** courbe des résiduels pour Ra

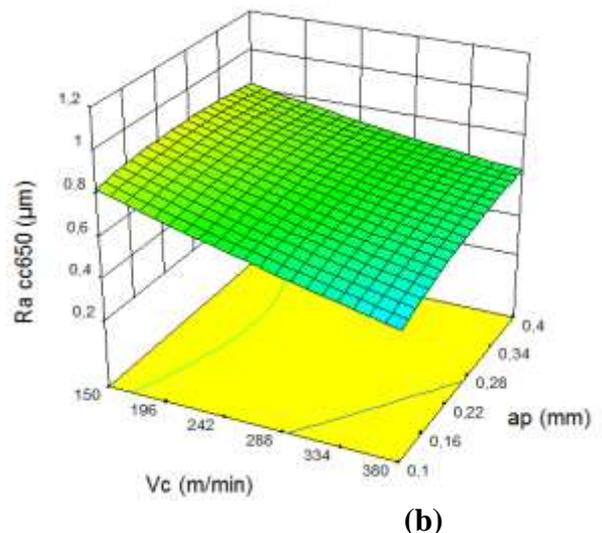
D’après les graphiques de distribution de l’erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l’erreur.

**III.3.2.6 Diagrammes de surface 3D de (Ra) :**

La figure (III-6 a, b, c) permet d’évaluer l’influence simultanée de (f ; Vc), (Vc; ap) et (f ;ap) sur le critère de rugosité de surface (Ra), montres que la pente de l’avance (f) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité (Ra) suivi par la vitesse de coupe (Vc) et en dernier lieu par la profondeur de passe (ap).



(a)



(b)

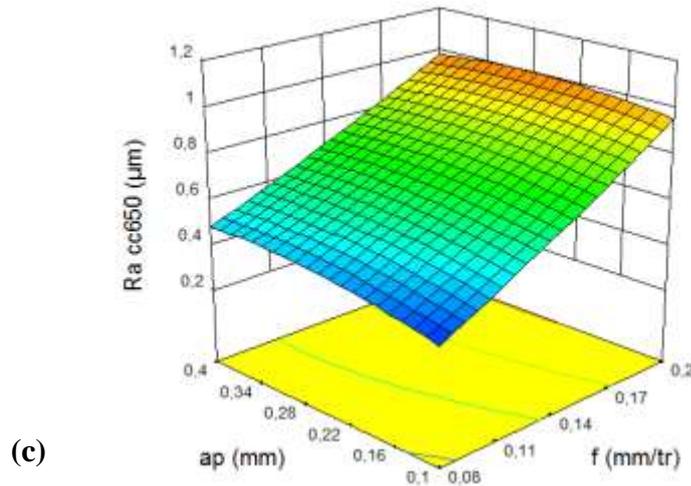


Figure III-6: Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de  $V_c$  ;  $f$  ;  $a_p$ .

### III.3.2.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

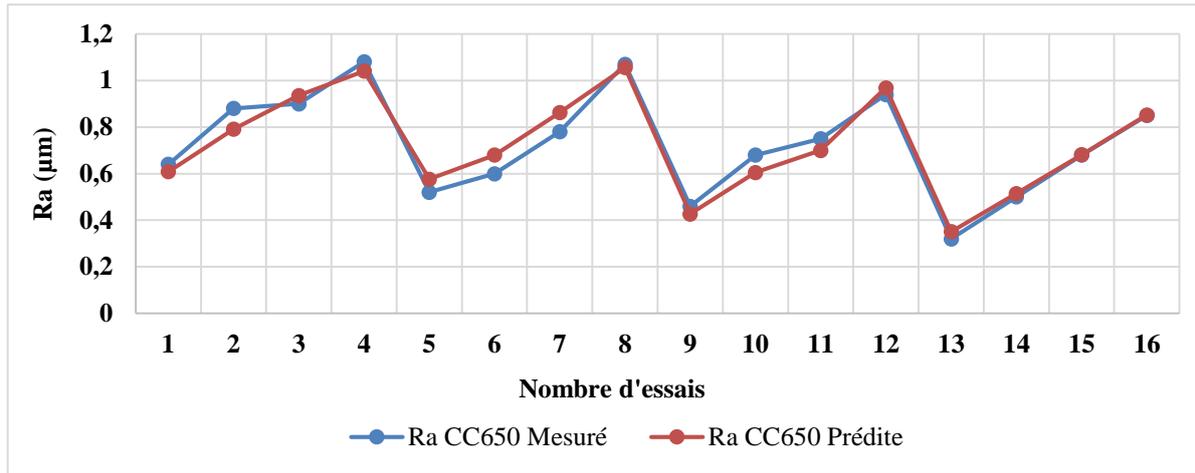
Le (Tableau III-3) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et la valeur prédite pour chaque essai. La formule pour déterminer le pourcentage d'erreur est :

$$\text{L'erreur} = \frac{\text{Valeur mesuré} - \text{Valeur prédite}}{\text{Valeur prédite}} \times 100 \dots \dots \dots \text{Équation III-7}$$

Le (Tableau III-3) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-3) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 15.

Essais	Ra CC650 Mesuré	Ra CC650 prédite	L'erreur
1	0,64	0,61	4,92%
2	0,88	0,79	10,08%
3	0,9	0,93	-3,93%
4	1,08	1,04	3,62%
5	0,52	0,58	-10,90%
6	0,6	0,68	-13,36%
7	0,78	0,86	-10,54%
8	1,07	1,06	1,34%
9	0,46	0,43	7,23%
10	0,68	0,61	11,01%
11	0,75	0,70	6,66%
12	0,94	0,97	-3,03%
13	0,32	0,35	-9,72%
14	0,5	0,51	-2,89%
15	0,68	0,68	-0,21%
16	0,85	0,85	-0,23%

Tableau III-3: Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites de Ra.



**Figure III-7:** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Ra.

La (**Figure III-7**) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité (Ra) pour les 16 essais réalisés. Ces droites permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs mesurées dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Les valeurs x représentent les numéros des essais (16 essais), tandis que les valeurs y correspondent les valeurs prédites et mesure. L'analyse de la (**Figure III-7**) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.3.3 Modèle de l'effort de coupe (Fx) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.3.3.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial(Fx) :

Les résultats de l'ANOVA de la composante Fx sont présentés dans le (**Tableau III-4**)

CC650								
Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Remarque
<b>Modèle</b>	9	1807,26	95,56	1807,26	200,807	14,36	0,002	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	413,53	21,87	301,53	301,529	21,57	0,004	<b>Significatif</b>
<b>f</b>	1	38,63	2,04	14,66	14,661	1,05	0,345	<b>N significatif</b>
<b>ap</b>	1	1041,49	55,07	329,94	329,939	23,60	0,003	<b>Significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	63,77	3,37	43,06	43,064	3,08	0,130	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	41,38	2,19	41,38	41,377	2,96	0,136	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	160,97	8,51	160,97	160,973	11,51	0,015	<b>Significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	0,44	0,02	0,60	0,595	0,04	0,843	<b>N significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	0,22	0,01	0,22	0,220	0,02	0,904	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	46,84	2,48	46,84	46,838	3,35	0,117	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	83,88	4,44	83,88	13,980			<b>N significatif</b>
<b>Total</b>	15	1891,14	100,00					

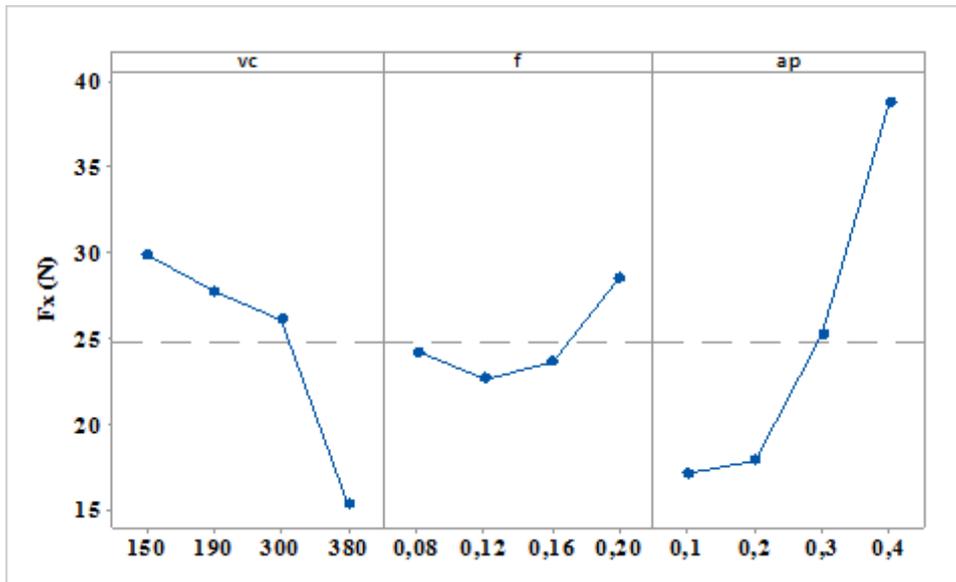
**Tableau III-4** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axiale (Fx).

L'analyse de la variance (ANOVA) (**Tableau III- 4**) montre que la profondeur de passe ( $a_p$ ) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 55,07% suivi par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution 21,87% et en dernier lieu l'avance ( $f$ ) avec une contribution 2,04%.

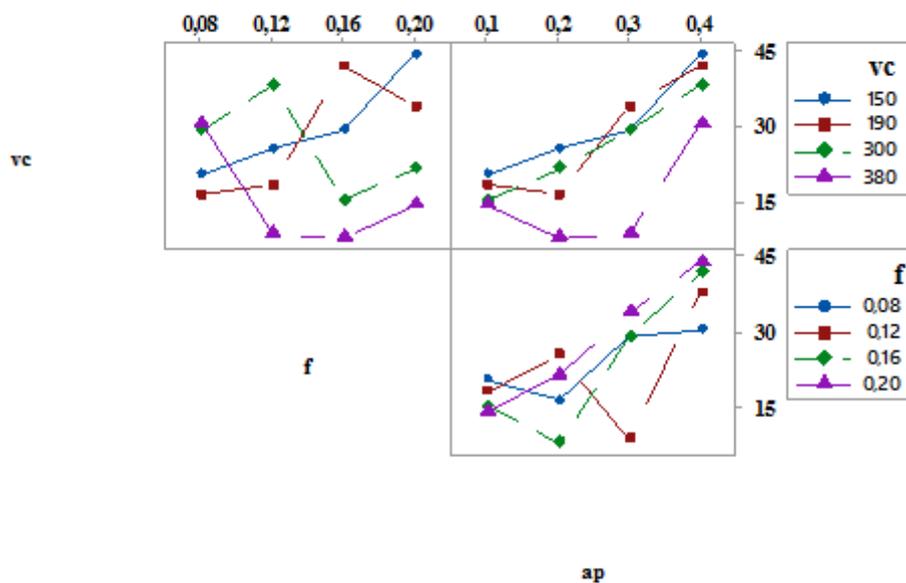
**III.3.3.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :**

La figure (**III-8**) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe ( $F_x$ ).

Nous remarquons que la profondeur de passe ( $a_p$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ) sont les facteurs les plus influents sur l'effort de coupe ( $F_x$ ) car il a la plus grande pente. L'avance ( $f$ ) affecte peu sur l'effort de coupe ( $F_x$ ).



**Figure III-8 :** Graphe des effets principaux de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur l'effort de coupe ( $F_x$ ).



**Figure III-9:** Diagramme d'interaction pour  $F_x$ .

La figure (III-9) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) ; entre la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ) ; entre  $V_c$  et la profondeur de passe ( $a_p$ ).

### III.3.3.3 Facteurs influents (graphe de Pareto) :

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit (Figure III-10). Cette figure classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence croissante sur l'effort axial pour la plaquette de coupe testée. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Les valeurs standardisées supérieures la ligne rouge ( $F_{\text{tableau}} = 2.447$ ) présentes un effet significatif, plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur présente une influence sur l'effort axial. Par contre, tous les paramètres et les interactions ayant un niveau inférieur à cette limite sont négligeables et ne sont pas pris en compte. En effet, la profondeur de passe ( $a_p$ ) est le paramètre le plus important suivi de La vitesse de coupe par tour ( $V_c$ ). L'avance ( $f$ ) n'a pratiquement aucun effet sur l'effort axial (Figure III-10). Ces résultats confirment les résultats trouvés au (Tableau III-4).

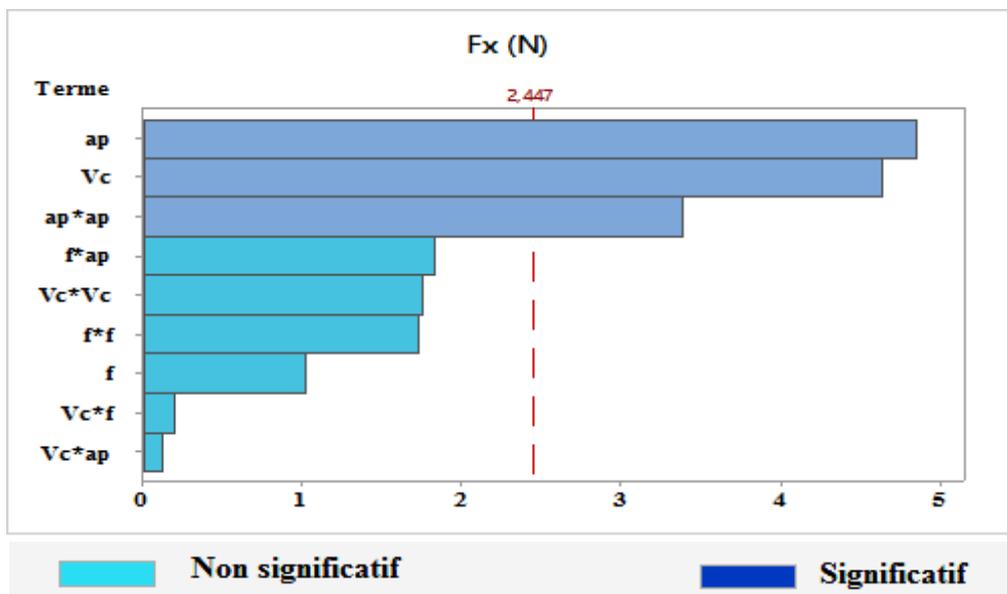


Figure III-10 : Grphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort axial ( $F_x$ )

### III.3.3.4 Analyse de régression ( $F_x$ ) en fonction de ( $V_c$ ; $f$ et $a_p$ ) :

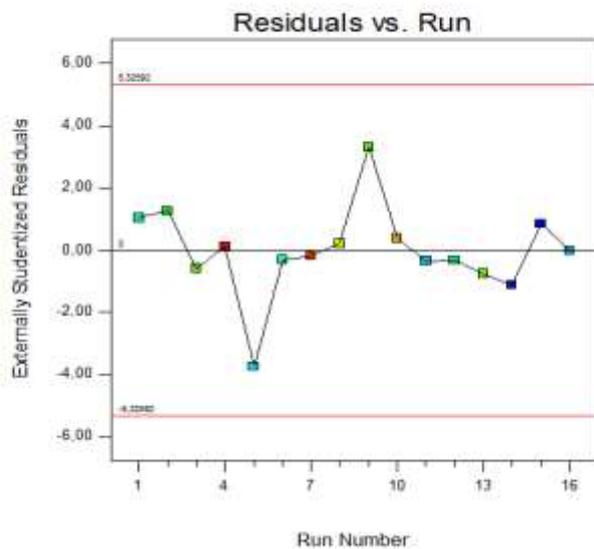
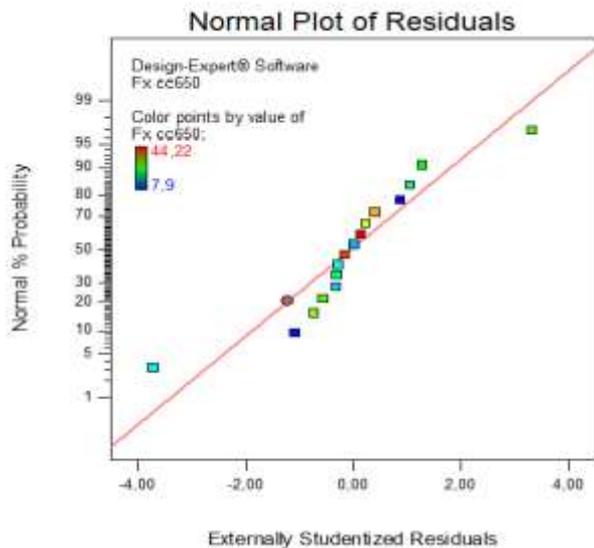
Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

Equation de régression en unités non codées :

$$F_{x_{cc650}} = 18,8 + 0,071 v_c - 114 f - 4,9 ap - 0,000325 v_c * v_c + 1005 f * f + 317,2 ap * ap \\ + 0,086 v_c * f + 0,021 v_c * ap - 603 f * ap.$$

$$R^2_{cc650} = 95,56\%, \quad Adj R^2_{cc650} = 88,91\%, \quad Pred R^2_{cc650} = 70,53\%.$$

### III.3.3.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :

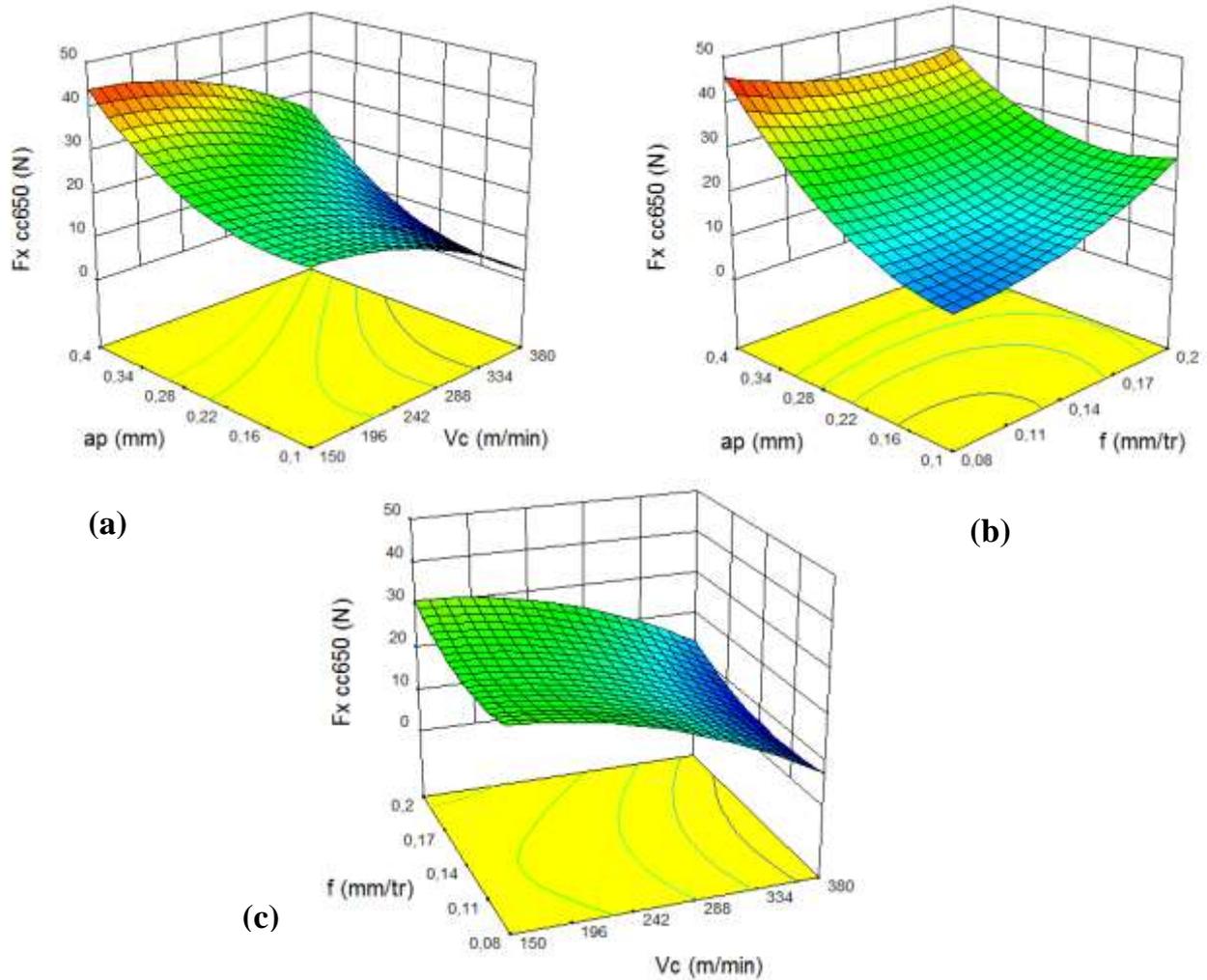


**Figure III-11** : courbe de normalité pour  $F_x$ . **Figure III-12** : courbe des résiduels pour  $F_x$ .

D'après les graphiques de distribution de l'erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l'erreur.

### III.3.3.6 Diagrammes de surfaces 3D de ( $F_x$ ) :

La figure (III-13 a, b, c) permet d'évaluer les diagrammes d'influence des ( $ap$  ;  $V_c$ ), ( $ap$  ;  $f$ ) et ( $f$ ;  $V_c$ ) sur la composante de l'effort de coupe ( $F_x$ ). D'après la figure on remarque que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort de coupe ( $F_x$ ), suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $ap$ ).



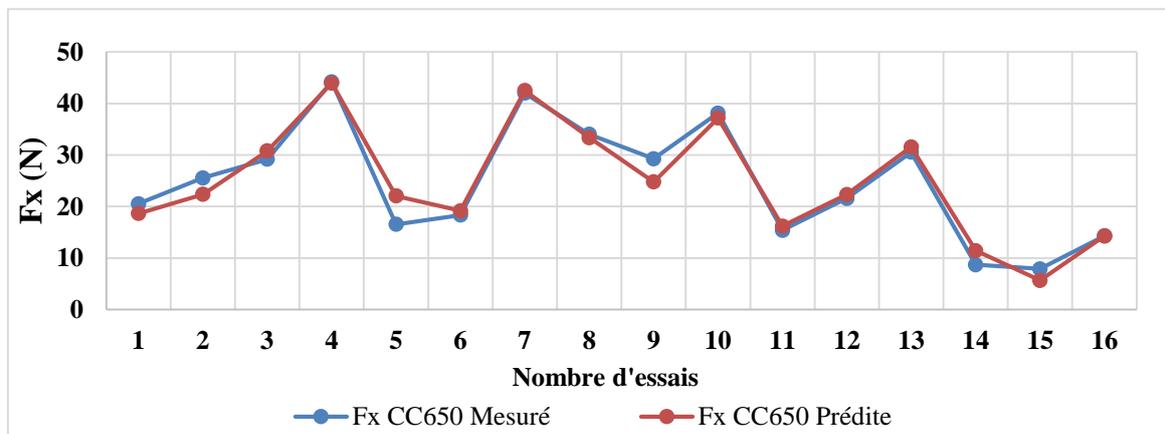
**Figure III-13:** Diagrammes de surface 3D de ( $F_x$ ) en fonction de ( $V_c$  :  $f$  :  $ap$ ).

### III.3.3.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-5) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et la valeur prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-5) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 16.

Essais	Fx CC650 Mesuré	Fx CC650 prédite	L'erreur
1	20,52	18,65	9,094%
2	25,55	22,35	12,530%
3	29,19	30,78	-5,456%
4	44,22	43,96	0,596%
5	16,52	22,05	-33,493%
6	18,34	19,17	-4,505%
7	42,01	42,49	-1,148%
8	34,02	33,35	1,968%
9	29,26	24,78	15,305%
10	38,13	37,18	2,504%
11	15,4	16,18	-5,052%
12	21,57	22,32	-3,459%
13	30,54	31,56	-3,325%
14	8,7	11,42	-31,236%
15	7,9	5,66	28,355%
16	14,3	14,28	0,120%

**Tableau III-5 :** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de (Fx)



**Figure III-14 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fx.

L'analyse de la (Figure III-14) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.3.4 Modèle de l'effort de coupe ( $F_y$ ) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.3.4.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial ( $F_y$ ) :

L'analyse de la variance ANOVA de la variation de la composante radiale de l'effort de coupe est représentée dans le (Tableau III-6).

CC650								
Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Remarque
<b>Modèle</b>	9	10813,1	90,39	10813,1	1201,46	6,27	0,018	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	1771,7	14,81	1,3	1,28	0,01	0,938	<b>N significatif</b>
<b>f</b>	1	956,8	8,00	75,8	75,80	0,40	0,553	<b>N significatif</b>
<b>ap</b>	1	6479,1	54,16	889,4	889,41	4,64	0,075	<b>Significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	67,9	0,57	5,6	5,55	0,03	0,870	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	10,4	0,09	10,4	10,35	0,05	0,824	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	317,6	2,66	317,6	317,64	1,66	0,245	<b>N significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	209,6	1,75	261,4	261,38	1,36	0,287	<b>N significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	62,0	0,52	62,0	61,98	0,32	0,590	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	938,0	7,84	938,0	938,05	4,90	0,069	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	1149,6	9,61	1149,6	191,61			
<b>Total</b>	15	11962,7	100,00					

**Tableau III-6:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial( $F_y$ ) .

L'analyse de la variance (ANOVA) pour la plaquette CC650 (Tableau III-6) montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 54,16% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 14,81%et en dernier lieu l'avance (f) avec une contribution 8,00%.

#### III.3.4.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :

La figure (III-15) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe ( $F_y$ ). Nous remarquons que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe ( $F_y$ ) car il a la plus grande pente. La vitesse de coupes et l'avance (f) affectent aussi l'effort de coupe ( $F_y$ ).

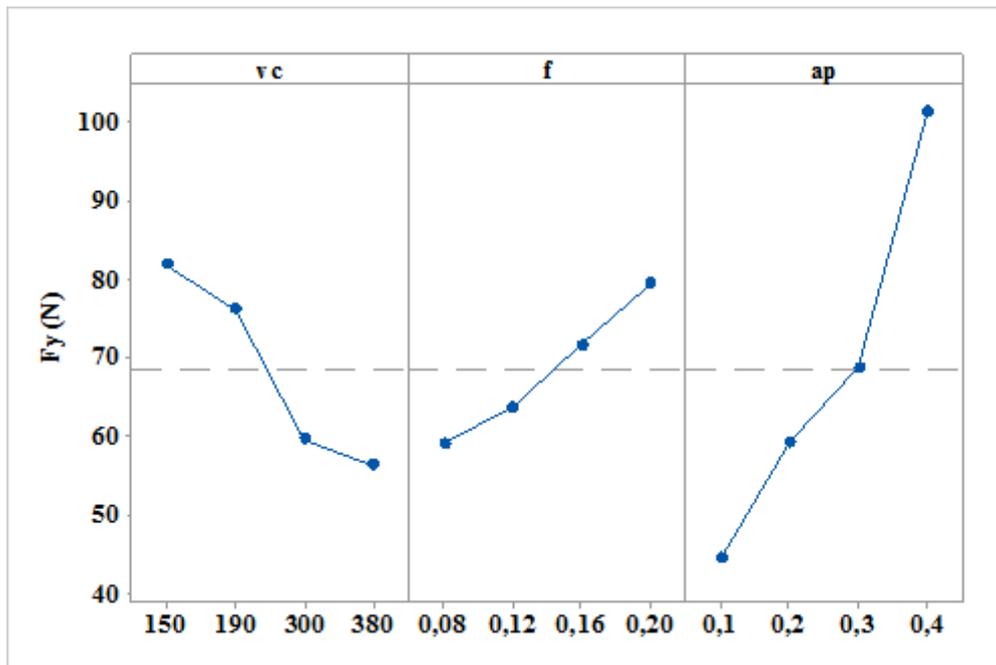


Figure III-15: Graphe des effets principaux de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur l'effort de coupe ( $F_y$ ).

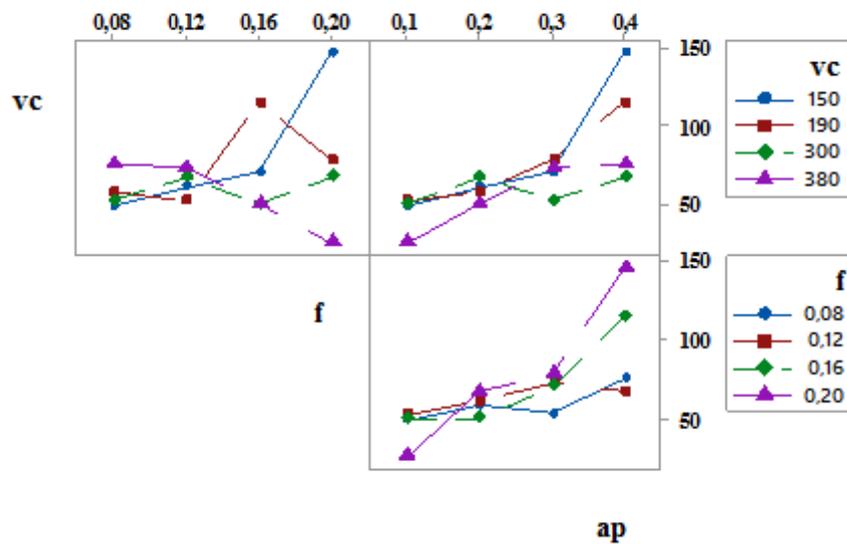


Figure III-16: Diagramme d'interaction pour  $F_y$ .

La (Figure III-16) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur l'effort de coupe ( $F_y$ ). Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) ; entre la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ) ; entre l'avance ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ ).

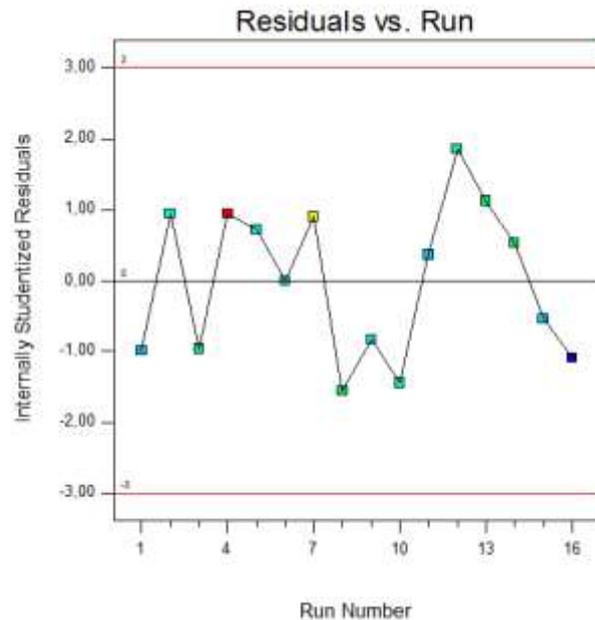
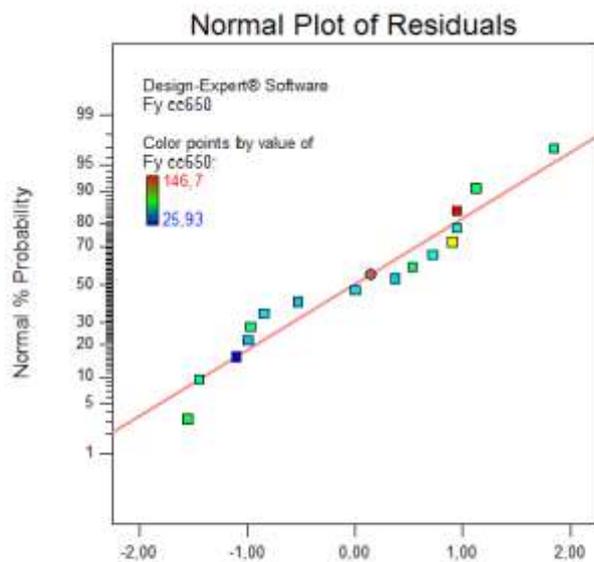
### III.3.4.3 Analyse de régression ( Fy ) en fonction de ( Vc ; f et ap ) :

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité non codée :

$$Fy_{CC650} = 66,2 + 0,284 vc - 247 f - 384 ap + 0,000117 vc*vc + 503 f*f + 446 ap*ap - 1,81 vc*f - 0,352 vc*ap + 2697 f*ap$$

$$R^2_{CC650} = 90,39\%, \quad Adj R^2_{CC650} = 75,97\%, \quad Pred R^2_{CC650} = 5,69\%.$$

### III.3.4.4 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :

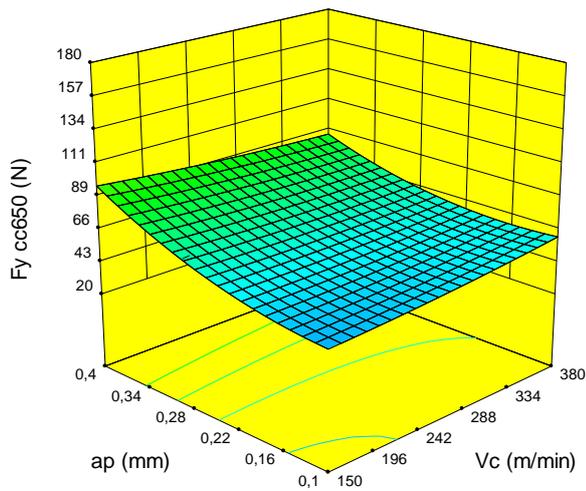


**Figure III-17** : courbe de normalité pour Fy      **Figure III-18** : courbe des résiduels pour Fy.

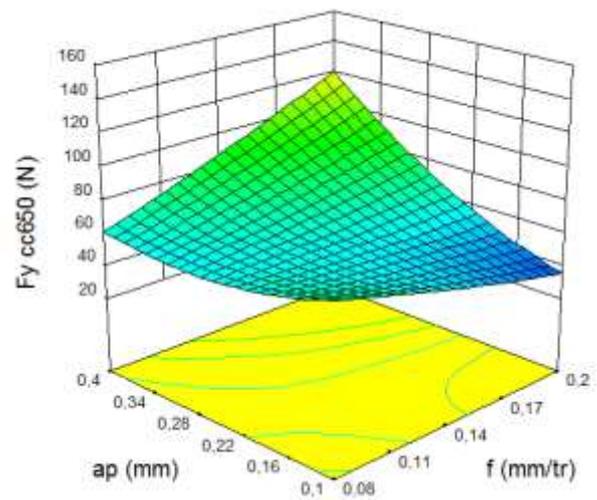
D'après les graphiques de distribution de l'erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l'erreur.

### III.3.4.5 Diagrammes de surface 3D de ( $F_y$ ) :

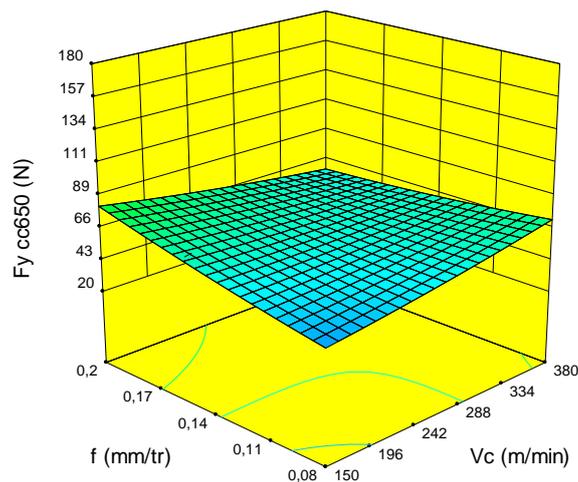
La figure (III-19 a, b, c) permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $a_p$ ;  $V_c$ ), ( $a_p$ ;  $f$ ) et ( $f$ ;  $V_c$ ) sur le composante de l'effort de coupe ( $F_y$ ), on remarque que la pente de la profondeur de passe ( $a_p$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort de coupe ( $F_y$ ), suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) .



(a)



(b)



(c)

**Figure III-19:** Diagrammes de surface 3D de ( $F_y$ ) en fonction de ( $V_c$ ;  $f$ ;  $a_p$ )

### III.3.4.6 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-7) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-7) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 6 .

Essais	Fy CC650 Mesuré	Fy cc650 prédite	L'erreur
1	49,16	55,70	-13,30%
2	61,13	51,85	15,18%
3	70,61	80,09	-13,43%
4	146,7	140,43	4,27%
5	58,38	51,32	12,09%
6	52,72	52,69	0,05%
7	115,37	106,52	7,67%
8	78,13	93,29	-19,40%
9	53,27	60,15	-12,92%
10	67,79	79,59	-17,40%
11	50,5	47,44	6,06%
12	67,39	52,27	22,44%
13	75,75	70,24	7,28%
14	73,33	68,32	6,84%
15	50,39	55,34	-9,83%
16	25,93	31,32	-20,78%

Tableau III-7: Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de Fy.

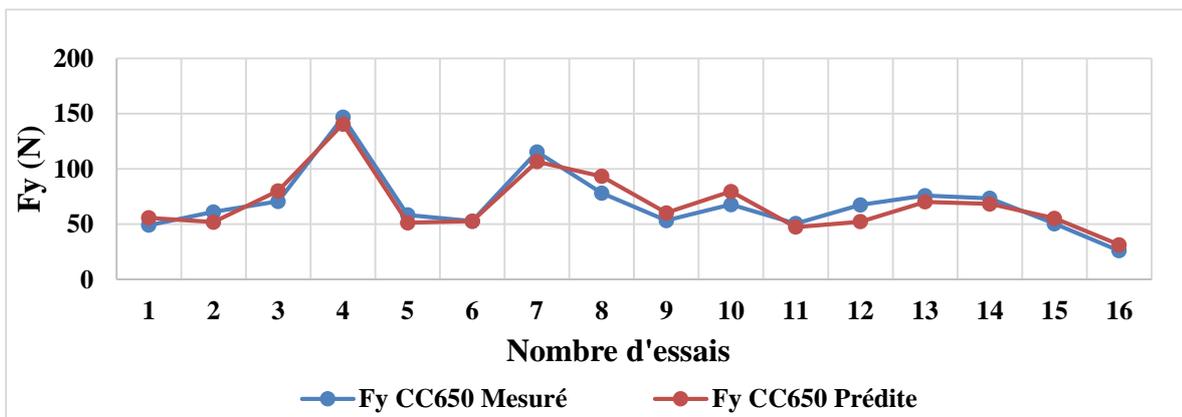


Figure III-20 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fy.

L'analyse de la (figure III-20) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.3.5 Modèle de l'effort de coupe (Fz) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.3.5.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel (Fz) :

Le (Tableau III-8) qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la composante tangentielle de l'effort (Fz).

CC650								
Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Remarque
<b>Modèle</b>	9	18629,5	95,86	18629,5	2069,95	15,44	0,002	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	2162,9	11,13	99,5	99,46	0,74	0,422	<b>N significatif</b>
<b>f</b>	1	4586,7	23,60	2876,5	2876,49	21,45	0,004	<b>Significatif</b>
<b>ap</b>	1	10922,0	56,20	5011,3	5011,28	37,37	0,001	<b>Significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	0,1	0,00	16,7	16,65	0,12	0,737	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	25,5	0,13	25,5	25,48	0,19	0,678	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	59,7	0,31	59,7	59,71	0,45	0,529	<b>N significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	96,3	0,50	226,7	226,71	1,69	0,241	<b>N significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	363,7	1,87	363,7	363,71	2,71	0,151	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	412,7	2,12	412,7	412,68	3,08	0,130	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	804,5	4,14	804,5	134,09			
<b>Total</b>	15	19434,1	100,00					

**Tableau III-8** : Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel (Fz).

L'analyse de la variance (ANOVA) (Tableau III-8) montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 56,20% suivi par l'avance (f) avec une contribution 23,60% et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 11,13%.

#### III.3.5.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :

La figure (III-21) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe (Fz). Nous remarquons que la profondeur de passe (ap) et l'avance (f) sont les facteurs les plus influents sur l'effort de coupe (Fz) car il a la plus grande pente. La Vitesse de coupe affecte aussi l'effort de coupe (Fz).

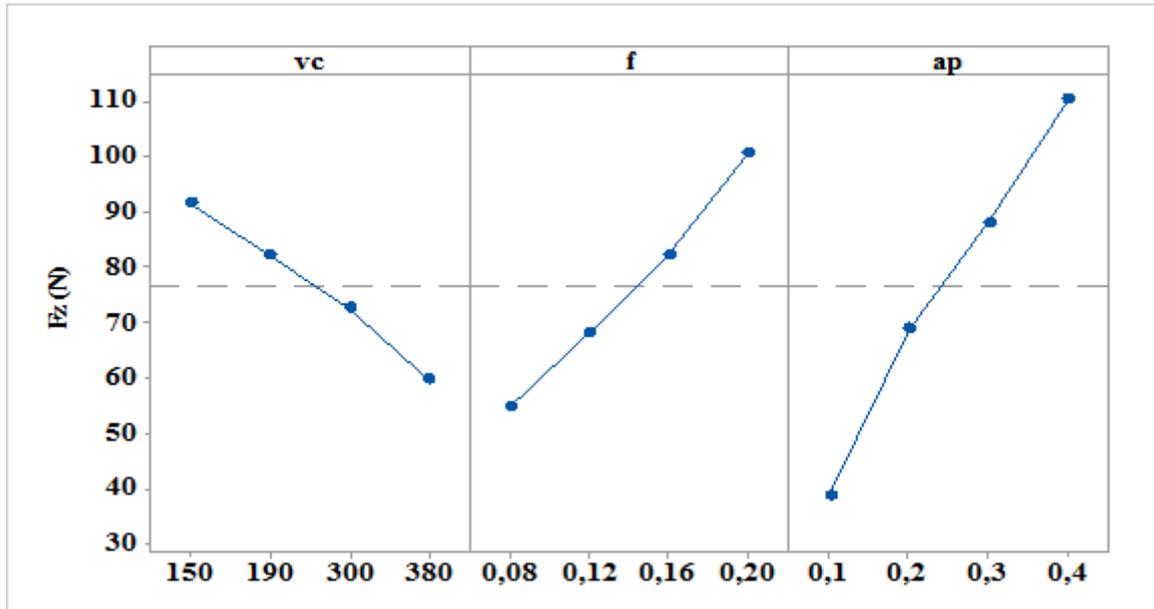


Figure III-21: Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur l'effort de coupe (Fz).

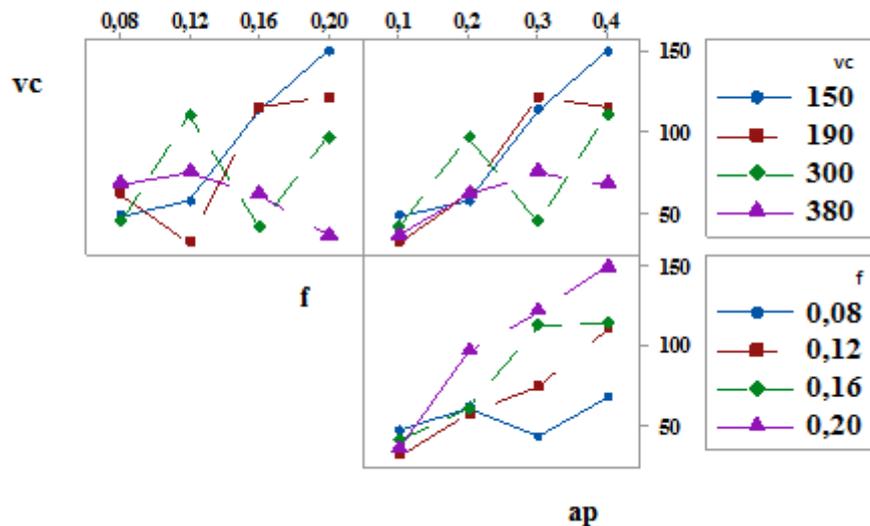
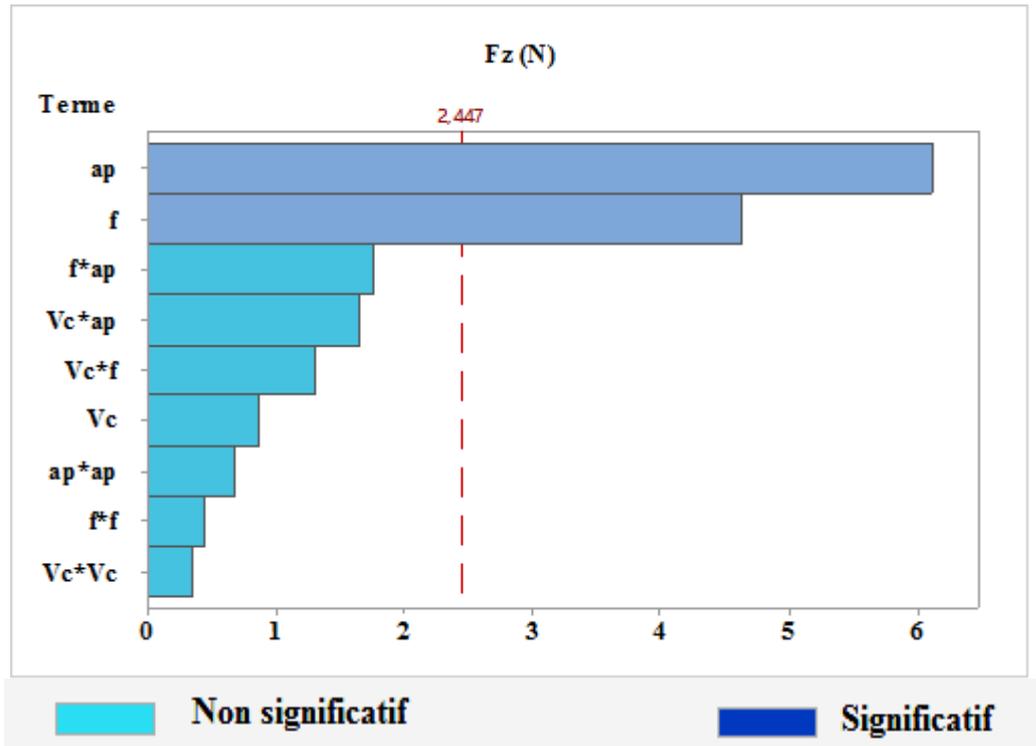


Figure III-22 Diagramme d'interaction pour Fz CC650.

La figure (III-22) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur Fz. Cette figure montre que nous avons des interactions entre les paramètres de coupe.

### III.3.5.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

L'analyse de graphe de Pareto (**Figure III-23**) nous permet de distinguer les paramètres et les interactions qui ont un effet significatif sur la réponse. Les paramètres les plus influents sur l'effort tangentiel ( $F_z$ ) sont la profondeur de passe, l'avance par tour. La contribution de la vitesse de coupe est négligeable ainsi que ses interactions.



**Figure III-23** Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort ( $F_z$ ).

### III.3.5.4 Analyse de régression ( $F_z$ ) en fonction de ( $V_c$ ; $f$ et $ap$ ) :

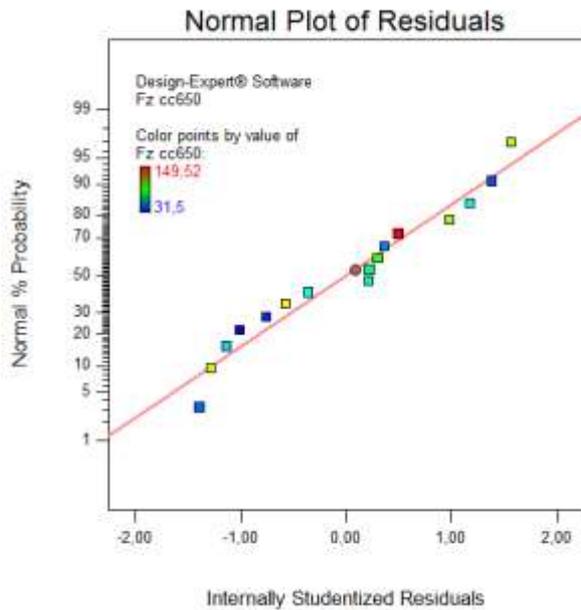
Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

Equation de régression en unités non codée :

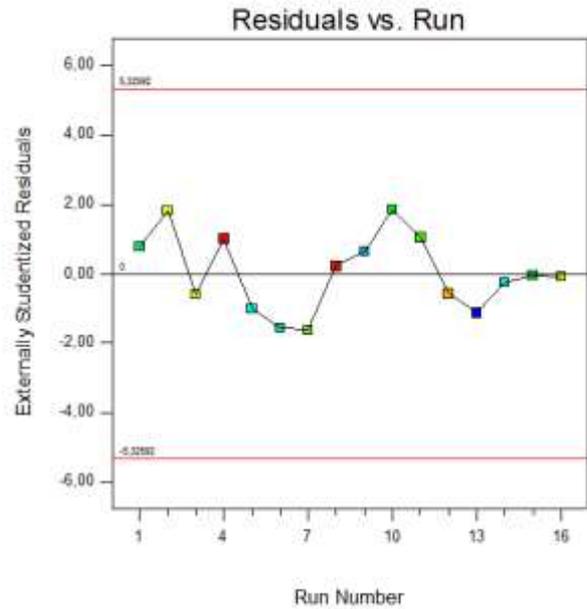
$$\mathbf{Fz}_{CC650} = 111,6 - 0,389 v_c - 561 f - 88 ap - 0,000202 v_c*v_c + 789 f*f - 193 ap*ap + 1,68 v_c*f + 0,852 v_c*ap + 1789 f*ap$$

$$\mathbf{R}^2_{CC650} = 95,86\%, \quad \mathbf{Adj R}^2_{CC650} = 89,65\%, \quad \mathbf{Pred R}^2_{CC650} = 74,15\%.$$

**III.3.5.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**



**Figure III-25 :** courbe de normalité pour Fz.

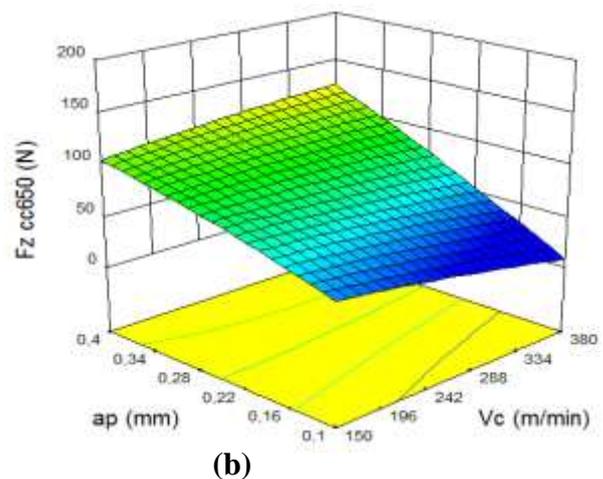
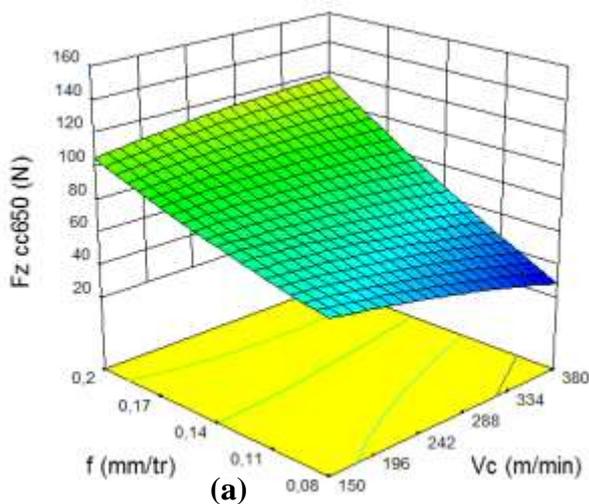


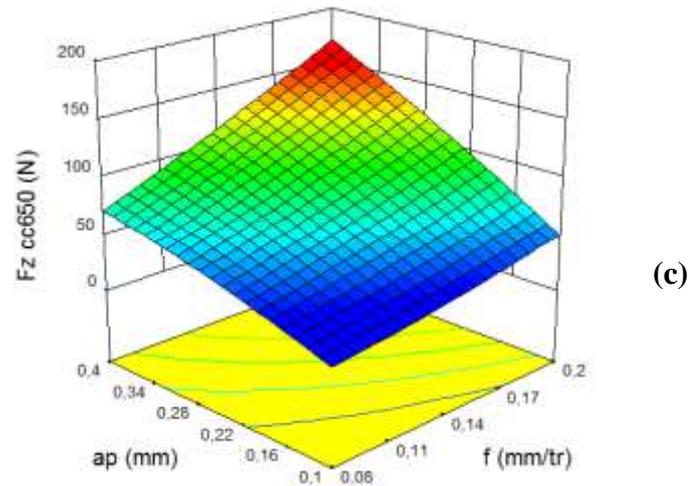
**Figure III-24 :** courbe des résiduels pour Fz.

D’après les graphiques de distribution de l’erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l’erreur.

**III.3.5.6 Diagrammes de surfaces 3D de (Fz) :**

La figure (III-26 a,b,c) permet d’évaluer l’influence simultanée de (f; Vc), (ap ; Vc) et (ap;f) sur le composante de l’effort de coupe (Fz), la figure montre que la pente de la profondeur de passe (ap) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l’effort de coupe (Fz), suivi par l’avance (f) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (Vc) .





**Figure III-26** Diagrammes de surface 3D de (Fz) en fonction de (Vc ; f ;ap).

### III.3.5.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-9) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-9) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 13.

Essais	Fz CC650 mesuré	Fz cc650 prédite	L'erreur
1	47,44	45,43	4,25%
2	56,98	66,24	-16,26%
3	112,88	100,03	11,39%
4	149,52	146,78	1,83%
5	61,44	51,83	15,64%
6	31,5	39,71	-26,07%
7	114,73	125,22	-9,14%
8	121,19	125,87	-3,86%
9	43,6	53,10	-21,79%
10	110,1	103,37	6,11%
11	40,75	31,30	23,18%
12	96,4	94,35	2,13%
13	67,45	66,57	1,30%
14	74,84	73,08	2,35%
15	61,12	63,94	-4,62%
16	36,05	39,15	-8,61%

**Tableau III-9** : Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de Fz.

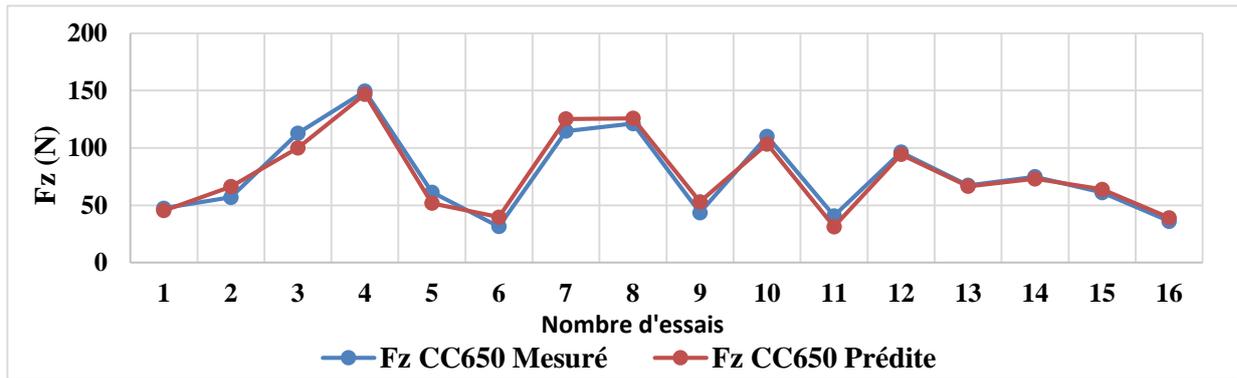


Figure III-27 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fz.

L'analyse de la (Figure III-27) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.4 Plaquette en céramique Wiper CC650WG :

#### III.4.1 Résultats des expériences

Le (Tableau III-10) représente les valeurs mesurées du critère de la rugosité ( $R_a$ ) et les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) pour la plaquette étudiée. Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 16 essais avec 3 facteurs à 4 niveaux.

$N^{\circ}$ D'Essai	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$R_a$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
1	150	0,08	0,1	0,33	28,06	38,14	30,7
2	150	0,12	0,2	0,34	33,32	63,07	49,43
3	150	0,16	0,3	0,35	36,88	92,69	96,84
4	150	0,2	0,4	0,37	42,78	125,76	139,62
5	190	0,08	0,2	0,29	27,33	63,59	68,85
6	190	0,12	0,1	0,31	29,35	55,94	13,5
7	190	0,16	0,4	0,33	34,27	117,26	125,93
8	190	0,2	0,3	0,35	37,1	123,18	116,21
9	300	0,08	0,3	0,26	26,23	82,84	60,33
10	300	0,12	0,4	0,28	28,57	119,49	106,29
11	300	0,16	0,1	0,31	32,08	48,53	38,8
12	300	0,2	0,2	0,32	29,57	97,09	82,64
13	380	0,08	0,4	0,23	24,2	91,8	64,81
14	380	0,12	0,3	0,27	23,23	106,34	85,67
15	380	0,16	0,2	0,29	21,1	74,21	87,45
16	380	0,2	0,1	0,3	20,27	61,39	56,11

Tableau III-10: Résultats de la rugosité et les efforts de coupes suivant  $L_{16}$  (plan de Taguchi).

### III.4.2 Modèle de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.4.2.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra :

Le (Tableau III-11) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité Ra :

CC650 WG								
Source	DL	Som Car séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
<b>Modèle</b>	9	0,020438	98,05	0,020438	0,002271	33,55	0,000	<b>Significatif</b>
<b>Vc</b>	1	0,012311	59,06	0,002795	0,002795	41,30	0,001	<b>Significatif</b>
<b>f</b>	1	0,007411	35,56	0,002325	0,002325	34,36	0,001	<b>Significatif</b>
<b>ap</b>	1	0,000211	1,01	0,000018	0,000018	0,27	0,623	<b>N significatif</b>
<b>Vc*Vc</b>	1	0,000262	1,26	0,000183	0,000183	2,70	0,151	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	0,000056	0,27	0,000056	0,000056	0,83	0,397	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	0,000006	0,03	0,000006	0,000006	0,09	0,771	<b>N significatif</b>
<b>Vc*f</b>	1	0,000017	0,08	0,000019	0,000019	0,28	0,617	<b>N significatif</b>
<b>Vc*ap</b>	1	0,000002	0,01	0,000002	0,000002	0,03	0,875	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	0,000161	0,77	0,000161	0,000161	2,39	0,173	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	0,000406	1,95	0,000406	0,000068			
<b>Total</b>	15	0,020844	100					

**Tableau III-11:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra

L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité de surface (Ra) montre que la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 59,06% suivi l'avance (f) par avec une contribution 35,56% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante.

#### III.4.2.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction pour Ra :

La figure (III-28) présente les effets principaux des facteurs considérés : la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la rugosité de surface Ra.

Nous remarquons que la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) sont les facteurs les plus influents sur la rugosité (Ra) car ils ont la plus grande pente. La profondeur de passe (ap) affecte peu sur la rugosité (Ra).

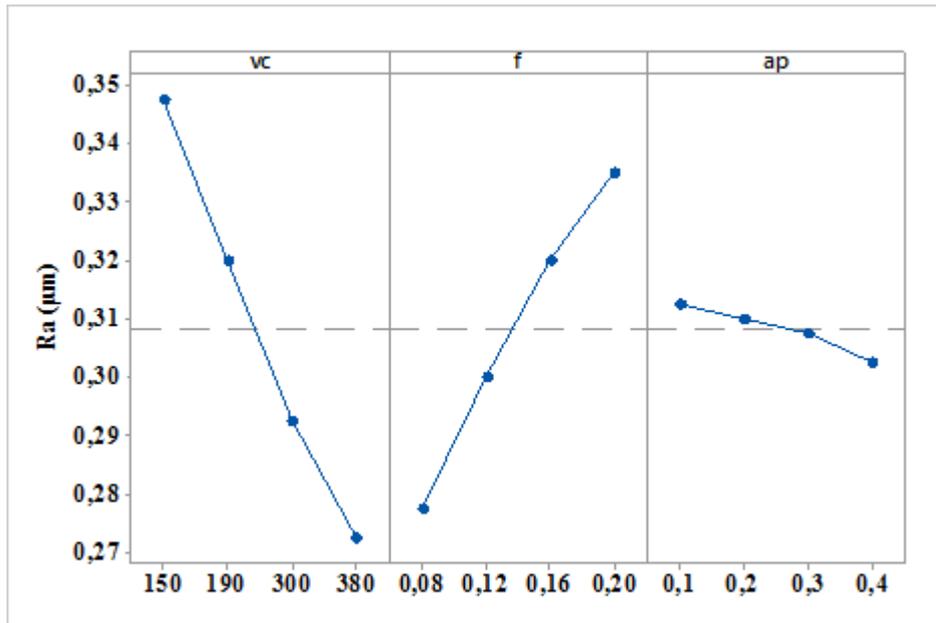


Figure III-28 : Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur la rugosité Ra.

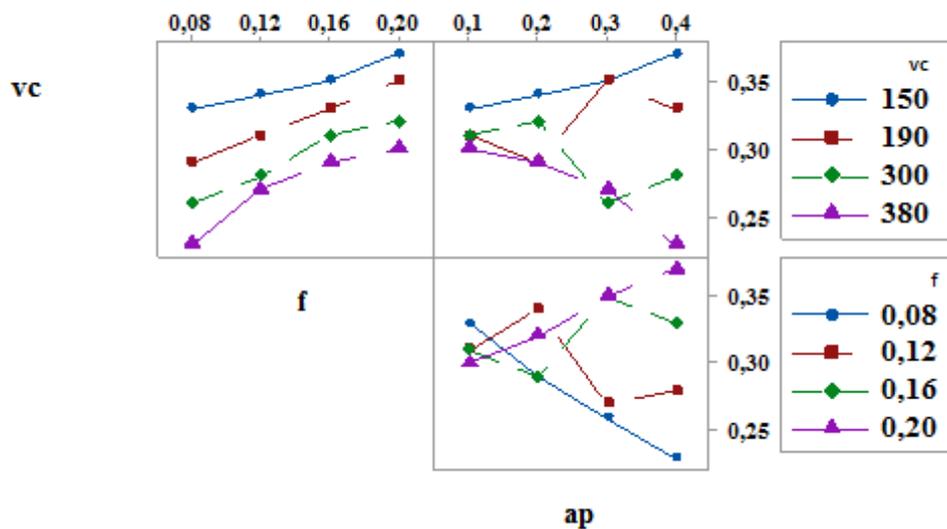


Figure III-29 Diagramme d'interaction pour Ra

La (Figure III-29) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe la rugosité Ra. Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) et entre la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ; entre l'avance (f) et la profondeur de passe (ap).

### III.4.2.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

L'analyse de graphe de Pareto (Figure III-30) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur le facteur étudié. Le diagramme de Pareto classe par ordre décroissants l'importance des paramètres et leurs interactions sur les facteurs de la rugosité.

Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est la vitesse de coupe suivie de l'avance par tour. La profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité Ra.

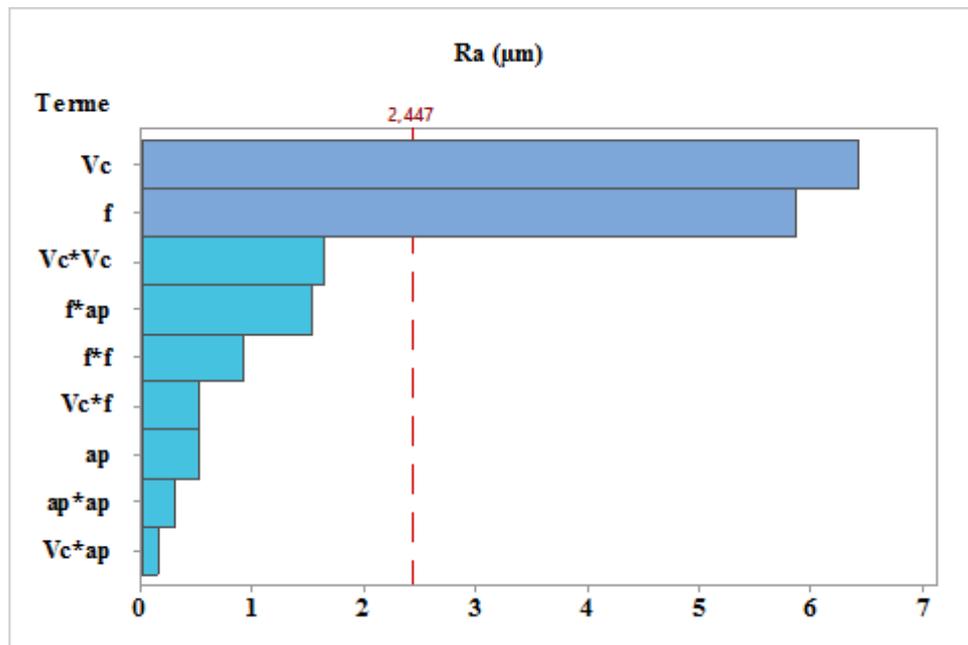


Figure III-30 : Graphe de PARETO de la rugosité.

### III.4.2.4 Analyse de régression ( Ra ) en fonction de ( Vc ; f et ap ) :

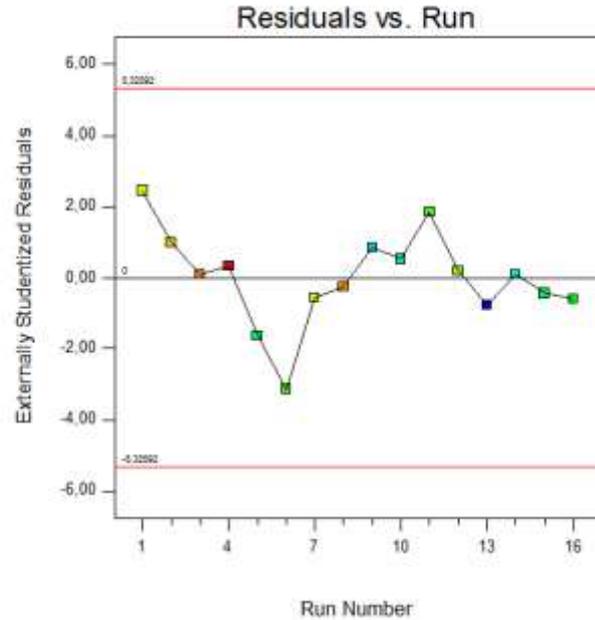
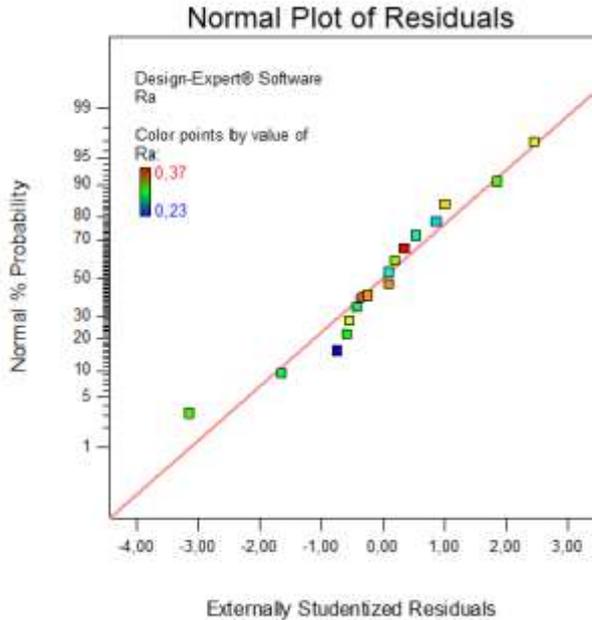
Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun des critères de rugosité et les éléments du régime de coupe, Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité,

Equation de régression en unités non codées :

$$\mathbf{Ra}_{cc650WG} = 0,3866 - 0,000692 Vc + 0,417 f - 0,159 ap + 0,000001 Vc*Vc - 1,17 f*f - 0,062 ap*ap + 0,000484 Vc*f + 0,000060 Vc*ap + 1,119 f*ap.$$

$$\mathbf{R}^2_{CC650WG} = 98,05\%, \quad \mathbf{Adj R}^2_{CC650WG} = 95,13 \%, \quad \mathbf{Pred R}^2_{CC650WG} = 84,14\%$$

### III.4.2.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :



**Figure III-31** courbe de normalité pour Ra.

**Figure III-32:** courbe des résiduels pour Ra.

D'après les graphiques de distribution de l'erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l'erreur.

### III.4.2.6 Diagrammes de surface 3D de (Ra) :

La figure (III-33 a,b,c) permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $f$ ;  $V_c$ ), ( $ap$ ;  $f$ ) et ( $V_c$ ;  $ap$ ) sur le critère de rugosité de surface ( $R_a$ ), d'après la figure on remarque que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité ( $R_a$ ) suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $ap$ ).

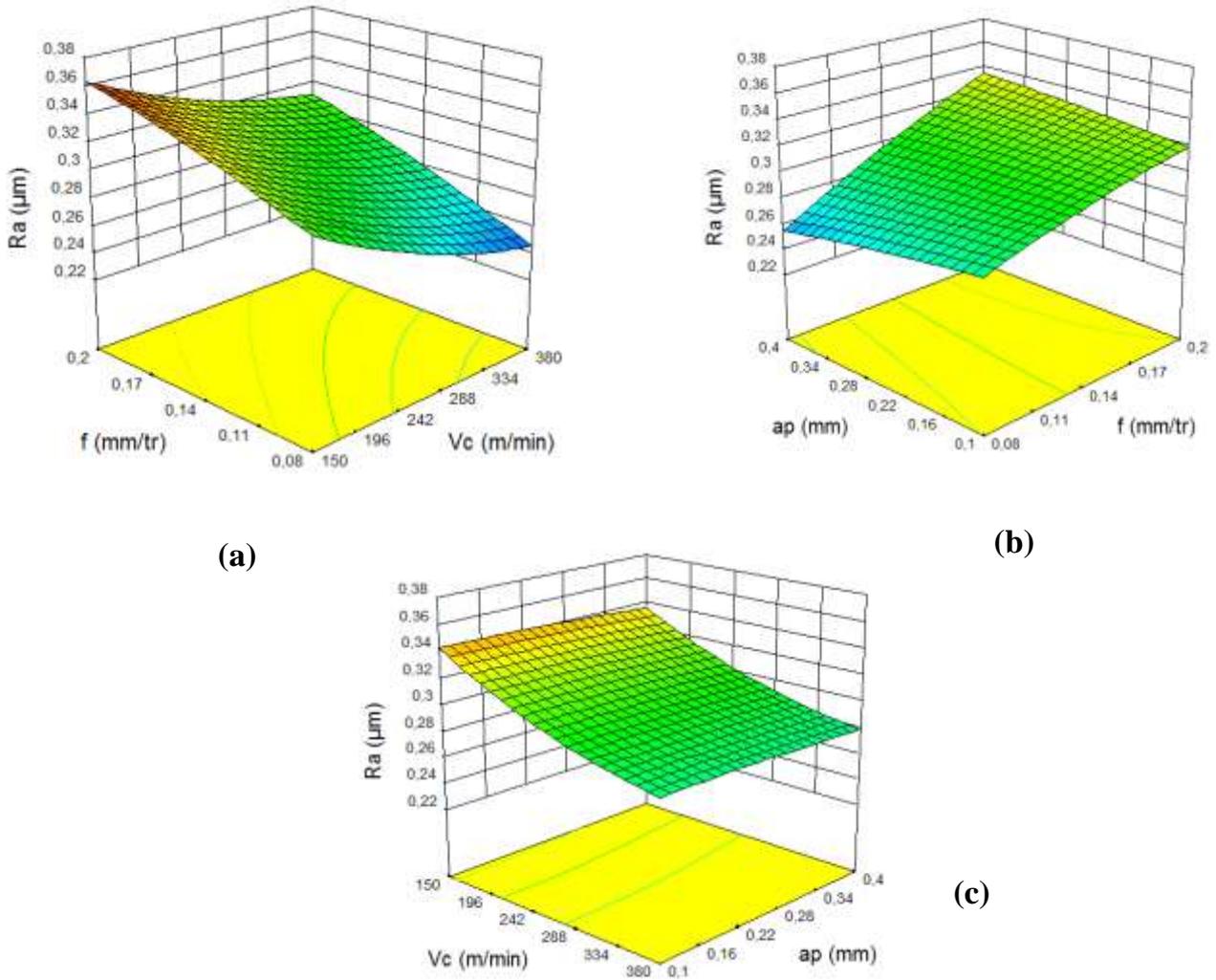


Figure III-33: Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc ; f ; ap).

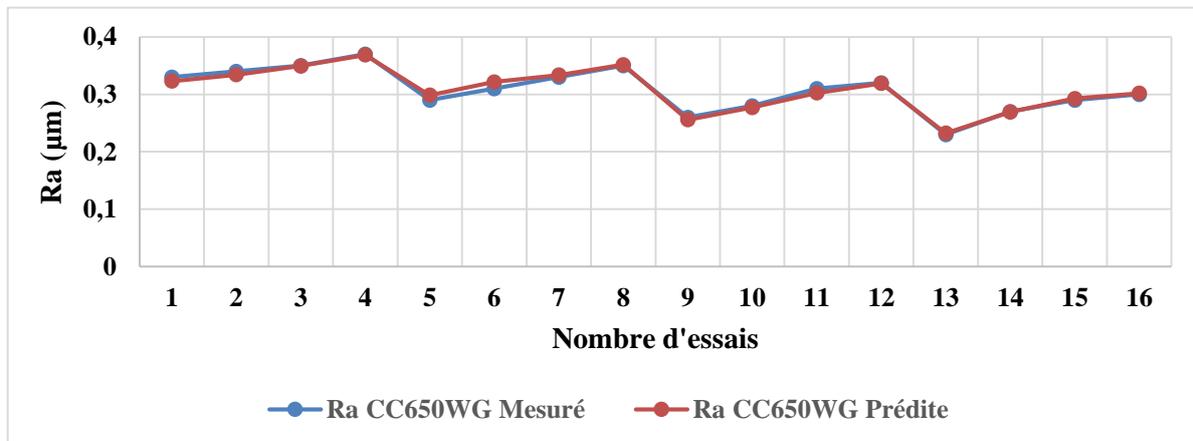
**III.4.2.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :**

Le (Tableau III-12) montre le pourcentage d’erreur entre la valeur mesurée et la valeur prédite pour chaque essai.

L’analyse du (Tableau III-12) montre que le pourcentage d’erreur minimale est obtenu avec le régime3.

Essais	Ra CC650WG Mesuré	Ra CC650WG prédite	L'erreur
1	0,33	0,32	2,16%
2	0,34	0,33	1,72%
3	0,35	0,35	0,18%
4	0,37	0,37	0,40%
5	0,29	0,30	-2,90%
6	0,31	0,32	-3,73%
7	0,33	0,33	-1,02%
8	0,35	0,35	-0,44%
9	0,26	0,26	1,66%
10	0,28	0,28	1,00%
11	0,31	0,30	2,45%
12	0,32	0,32	0,33%
13	0,23	0,23	-0,98%
14	0,27	0,27	0,23%
15	0,29	0,29	-0,88%
16	0,30	0,30	-0,59%

**Tableau III-12:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites.



**Figure III-34** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Ra

L'analyse de la figure (III-34) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.4.3 Modèle de l'effort de coupe (Fx) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.4.3.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial(Fx) :

Les résultats de l'ANOVA de la composante Fx sont présentés dans le (Tableau III-13)

CC650WG								
Source	DL	Som Car séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
<b>Modèle</b>	9	550,561	95,96	550,561	61,173	15,82	0,002	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	350,562	61,10	118,306	118,306	30,59	0,001	<b>Significatif</b>
<b>f</b>	1	83,150	14,49	13,101	13,101	3,39	0,115	<b>N significatif</b>
<b>ap</b>	1	65,341	11,39	0,662	0,662	0,17	0,693	<b>N significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	7,370	1,28	6,966	6,966	1,80	0,228	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	0,664	0,12	0,664	0,664	0,17	0,693	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	1,452	0,25	1,452	1,452	0,38	0,563	<b>N significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	41,375	7,21	40,643	40,643	10,51	0,018	<b>Significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	0,624	0,11	0,624	0,624	0,16	0,702	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	0,022	0,00	0,022	0,022	0,01	0,943	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	23,205	4,04	23,205	3,867			<b>N significatif</b>
<b>Total</b>	15	573,766	100,00					<b>N significatif</b>

**Tableau III-13:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axiale (Fx) .

L'analyse de la variance (ANOVA) (Tableau III-13) montre que la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 61,10% suivi par l'avance (f) avec une contribution 14,49% et en dernier lieu profondeur de passe (ap) avec une contribution 11,39%.

#### III.4.3.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :

La figure (III-35) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe (Fx).

Nous remarquons que la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (Fx) car il a la plus grande pente. L'avance (f) et la profondeur de passe (ap) affecte peu sur l'effort de coupe (Fx).

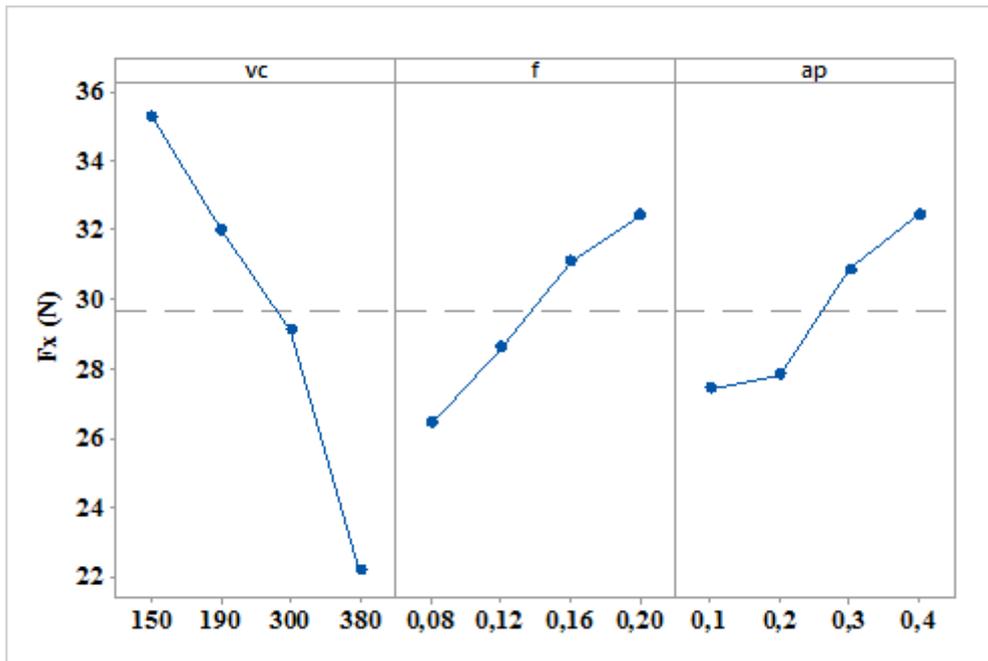


Figure III-35: Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur l’effort de coupe (Fx)

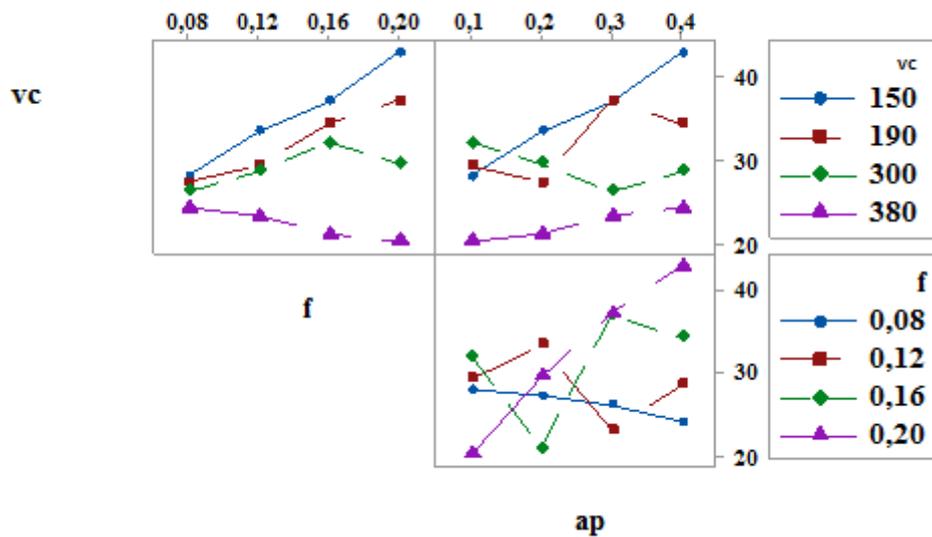


Figure III-36 : Diagramme d’interaction pour Fx

La (Figure III-36) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur l’effort de coupe (Fx). Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (Vc) et l’avance (f) et entre la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ; entre l’avance (f) et la profondeur de passe (ap).

### III.4.3.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit (Figure III-37).

Cette figure classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence croissante sur l'effort axial. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Les valeurs standardisées supérieures la ligne rouge ( $F_{\text{tableau}} = 2.447$ ) présentes un effet significatif, plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur présente une influence sur l'effort axial. Par contre, tous les paramètres et les interactions ayant un niveau inférieur à cette limite sont négligeables et ne sont pas pris en compte.

En effet, La vitesse de coupe par tour est le paramètre le plus important. La profondeur de passe et l'avance n'a pratiquement aucun effet sur l'effort axial (Figure III-37). Ces résultats confirment les résultats trouvés au (Tableau III-13).

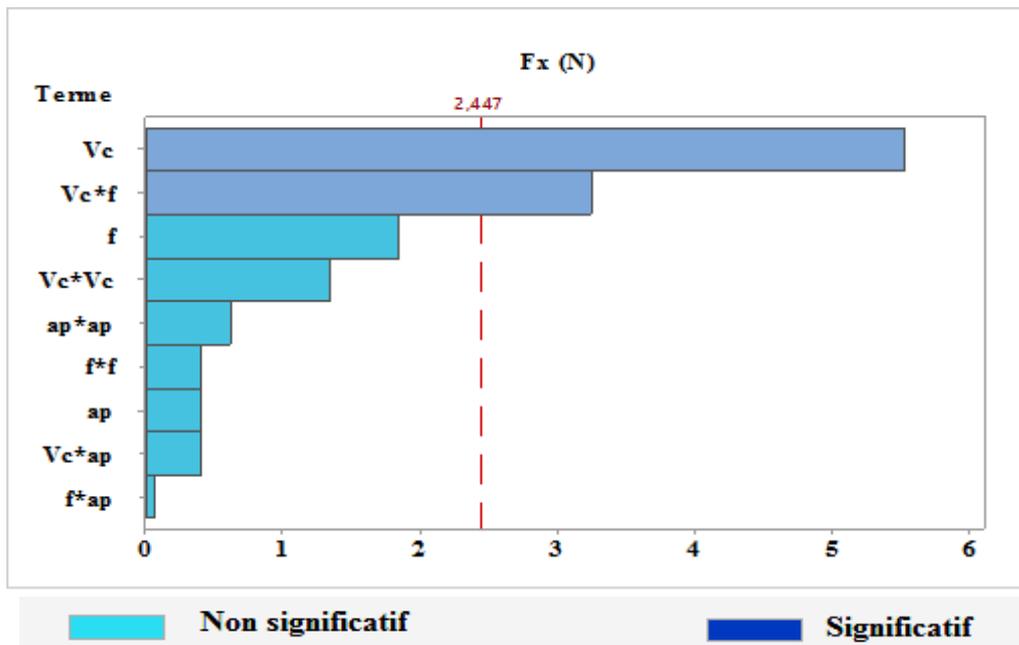


Figure III-37: Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort axial (Fx).

### III.4.3.4 Analyse de régression ( Fx ) en fonction de ( Vc ; f et ap ) :

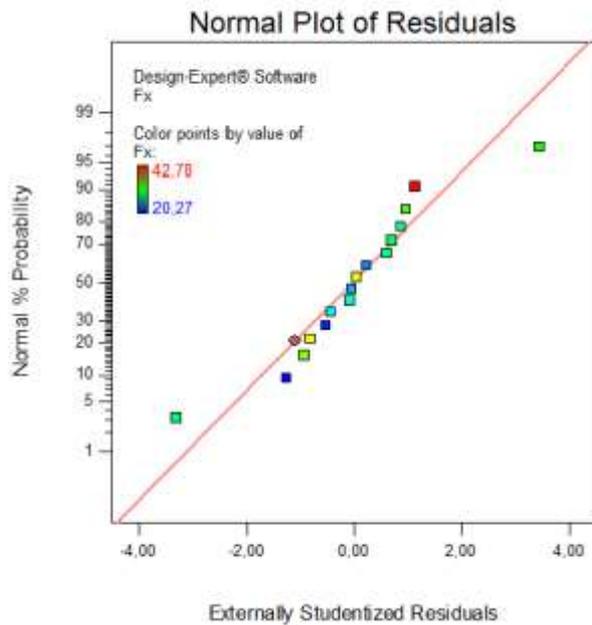
Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

Equation de régression en unités non codées

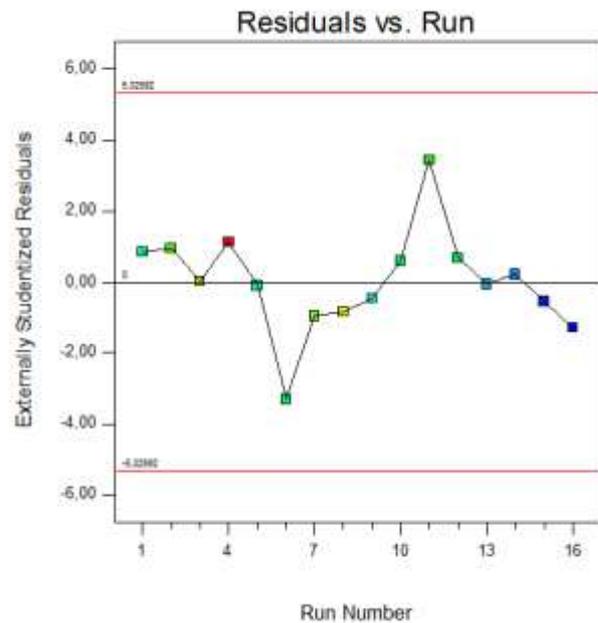
$$F_{x_{cc650WG}} = 0,6 + 0,1254 v_c + 265 f - 7,3 a_p - 0,000131 v_c * v_c - 127 f * f + 30,1 a_p * a_p - 0,712 v_c * f - 0,0353 v_c * a_p - 13 f * a_p.$$

$$R^2_{CC650WG} = 95,96\%, \text{ Adj } R^2_{CC650WG} = 89,89\%, \text{ Pred } R^2_{CC650WG} = 66,14\%$$

### III.4.3.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :



**Figure III-38** courbe de normalité pour Fx.

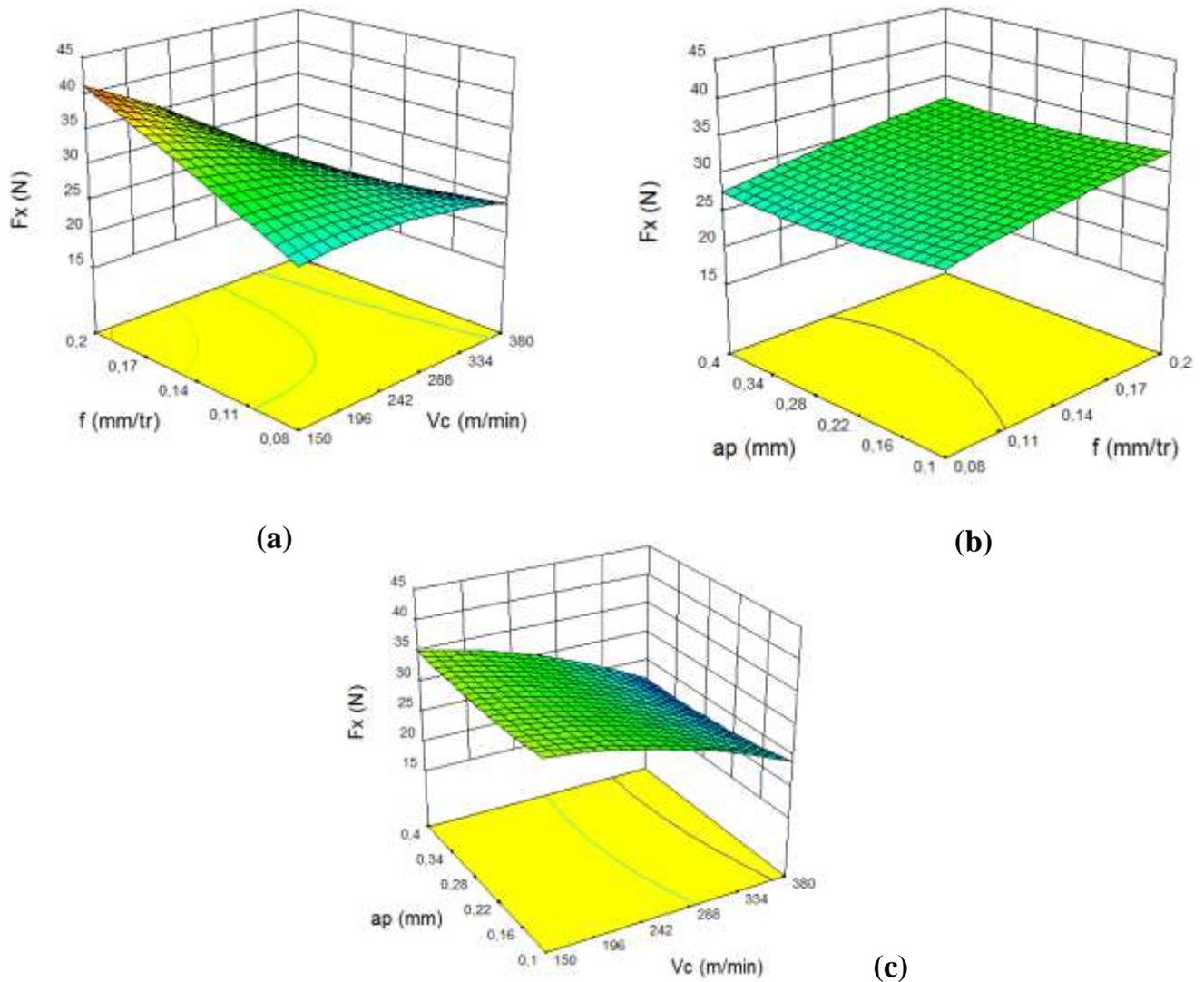


**Figure III-39** courbe des résiduels pour Fx.

D'après les graphiques de distribution de l'erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l'erreur.

### III.4.3.6 Diagrammes de surfaces 3D de ( $F_x$ ) :

La figure (III-40 a, b, c) permet d'évaluer les diagrammes d'influence des ( $f; V_c$ ) ( $ap; f$ ), et ( $ap; V_c$ ) sur le composante de l'effort de coupe ( $F_x$ ). Les figures montrent que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort de coupe ( $F_x$ ), suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $ap$ ).



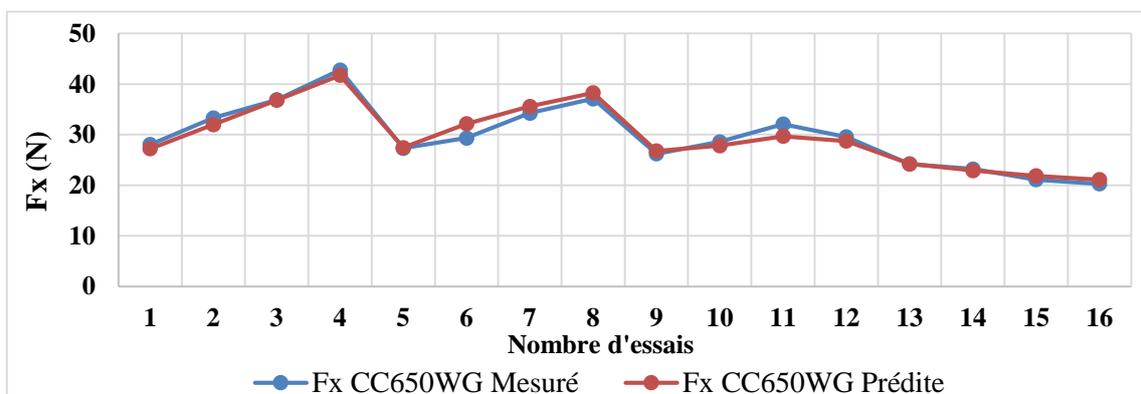
**Figure III-40:** Diagrammes de surface 3D de ( $F_x$ ) en fonction de ( $V_c ; f ; ap$ ) .

### III.4.3.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-14) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-14) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 13.

Essais	Fx CC650WG Mesuré	Fx CC650WG prédite	L'erreur
1	28,06	27,23	2,96%
2	33,32	31,98	4,04%
3	36,88	36,81	0,18%
4	42,78	41,75	2,42%
5	27,33	27,45	-0,44%
6	29,35	32,16	-9,58%
7	34,27	35,58	-3,82%
8	37,1	38,27	-3,15%
9	26,23	26,78	-2,09%
10	28,57	27,82	2,61%
11	32,08	29,70	7,43%
12	29,57	28,73	2,86%
13	24,2	24,23	-0,14%
14	23,23	22,90	1,44%
15	21,1	21,85	-3,57%
16	20,27	21,11	-4,15%

**Tableau III-14:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de Fx



**Figure III-41 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fx

L'analyse de la (Figure III-41) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

### III.4.4 Modèle de l'effort de coupe ( $F_y$ ) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.4.4.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial ( $F_y$ ) :

L'analyse de la variance ANOVA de la variation de la composante radiale de l'effort de coupe est représentée dans le (Tableau III-15).

CC650WG								
Source	DL	Som Car séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
<b>Modèle</b>	9	11650,3	96,73	11650,3	1294,48	19,71	0,001	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	1,3	0,01	130,5	130,51	1,99	0,208	<b>N significatif</b>
<b>f</b>	1	1814,5	15,07	1202,0	1202,01	18,30	0,005	<b>Significatif</b>
<b>ap</b>	1	9202,5	76,40	3315,3	3315,31	50,47	0,000	<b>Significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	136,4	1,13	195,2	195,24	2,97	0,135	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	2,4	0,02	2,4	2,45	0,04	0,853	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	124,9	1,04	124,9	124,88	1,90	0,217	<b>N significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	1,1	0,01	26,0	25,97	0,40	0,553	<b>N significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	189,2	1,57	189,2	189,19	2,88	0,141	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	178,0	1,48	178,0	178,00	2,71	0,151	<b>N significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	394,1	3,27	394,1	65,68			
<b>Total</b>	15	12044,4	100,00					

**Tableau III-15** : Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial( $F_y$ ).

L'analyse de la variance (ANOVA) (Tableau III- 15) montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 76,40% suivi par l'avance (f) avec une contribution 15,07% et en dernier lieu vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 0,01%.

#### III.4.4.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :

La figure (III-42) présentes les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe ( $F_y$ ).

Nous remarquons que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe ( $F_y$ ) car il a la plus grande pente. L'avance (f) affecte aussi l'effort de coupe ( $F_y$ ).

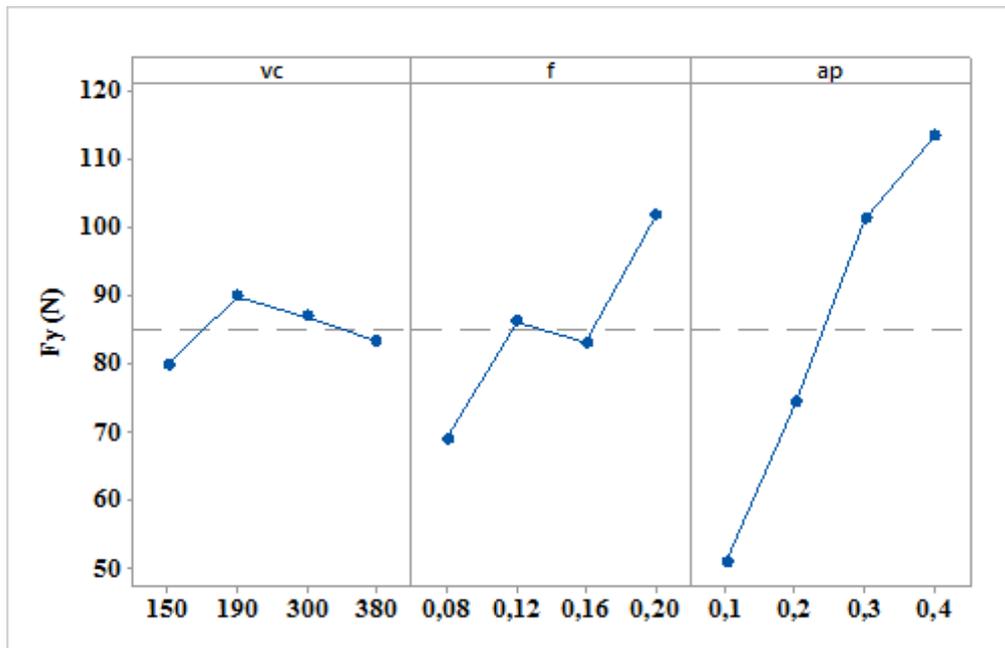


Figure III-42 : Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur l’effort de coupe (Fy).

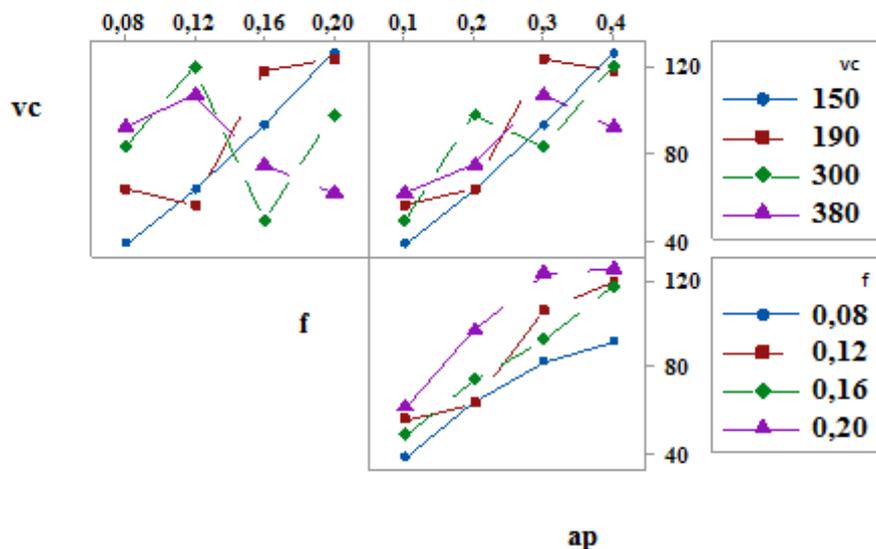


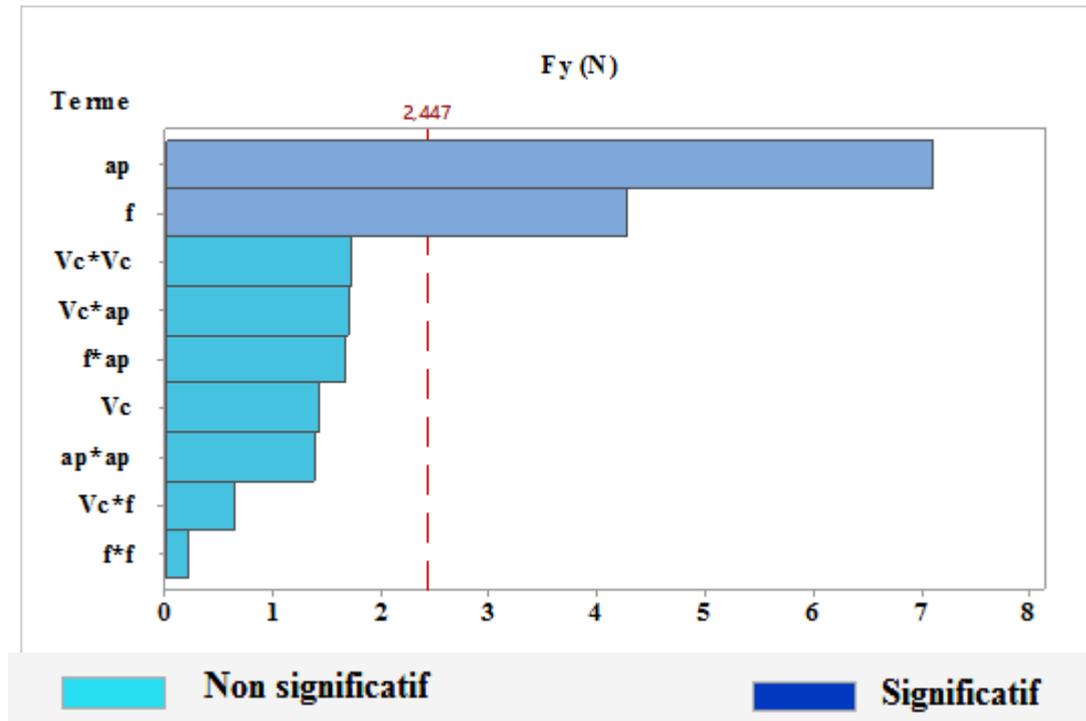
Figure III-43 : Diagramme d’interaction pour Fy.

La (Figure III-43) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur les effort de coupe (Fy). Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (Vc) et l’avance (f) ; entre la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) ; entre l’avance (f) et la profondeur de passe (ap).

### III.4.4.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

Le graphe de Pareto (**Figure III-44**) montre les points suivants :

La profondeur de passe (ap) présente un effet énorme sur l'effort radial (Fy), suivie par l'avance par tour (f). La contribution de la vitesse de coupe (Vc) est négligeable.



**Figure III-44** : Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort (Fy)

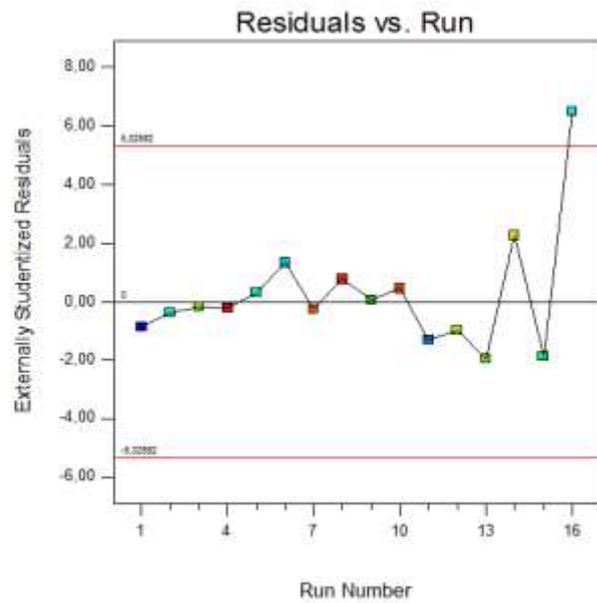
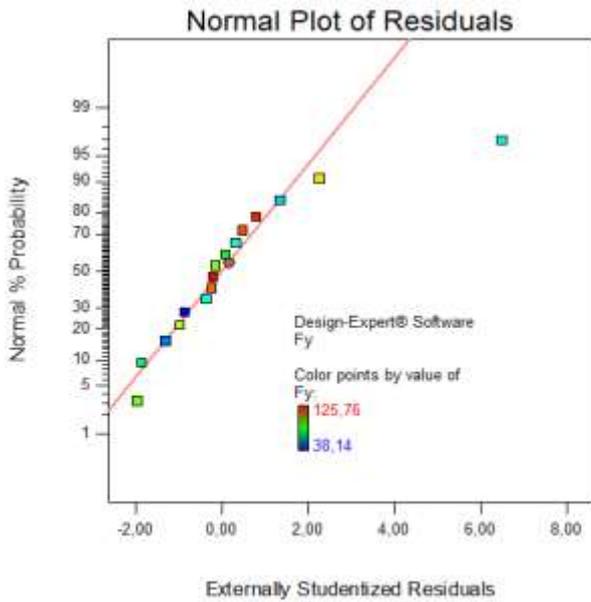
### III.4.4.4 Analyse de régression (Fy) en fonction de (Vc ; f et ap) :

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité non codée :

$$Fy_{CC650WG} = 12,1 + 0,188 v_c - 155 f + 50 a_p - 0,000692 v_c * v_c + 245 f * f - 279 a_p * a_p + 0,569 v_c * f + 0,615 v_c * a_p + 1175 f * a_p.$$

$$R^2_{CC650WG} = 96,73\%, \quad Adj R^2_{CC650WG} = 91,82\%, \quad Pred R^2_{CC650WG} = 49,46\%.$$

**III.4.4.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

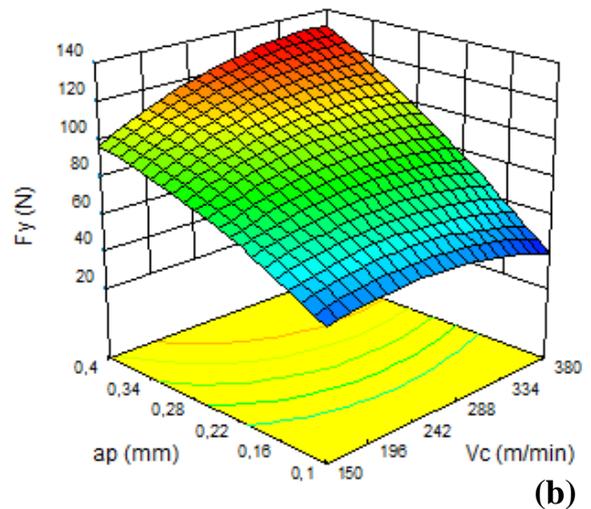
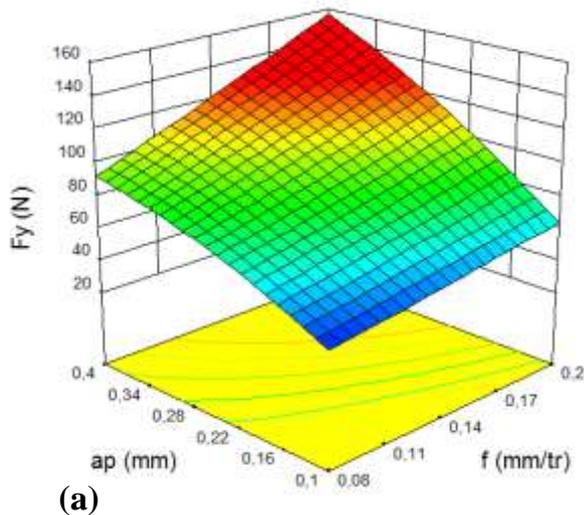


**Figure III-45:** courbe de normalité pour  $F_y$ .

**Figure III-46:** courbe des résiduels pour  $F_y$ .

**III.4.4.6 Diagrammes de surface 3D de ( $F_y$ ) :**

La figure (III- 47 a, b, c) permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $a_p$ ;f), ( $a_p$  ; $V_c$ ) et (f; $V_c$ ) sur le composante de l'effort de coupe ( $F_y$ ), montres que la pente de la profondeur de passe ( $a_p$ ) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort de coupe ( $F_y$ ), suivi par l'avance (f) et en dernier lieu par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) .



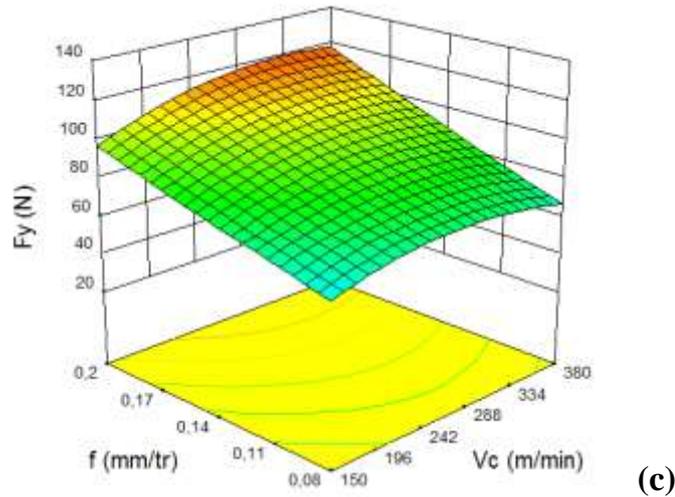


Figure III-47 : Diagrammes de surface 3D de  $(F_y)$  en fonction de  $(V_c ; f ; a_p)$ .

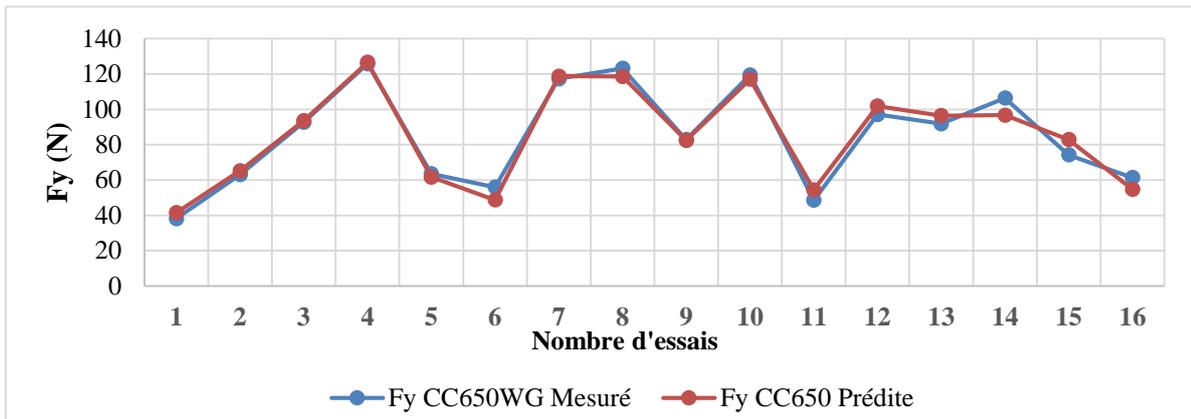
#### III.4.4.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-16) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai.

L'analyse du (Tableau III-16) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 9.

Essais	$F_y$ CC650WG Mesuré	$F_y$ CC650WG prédite	L'erreur
1	38,14	41,54	-8,91%
2	63,07	65,31	-3,55%
3	92,69	93,68	-1,06%
4	125,76	126,63	-0,69%
5	63,59	61,62	3,09%
6	55,94	48,71	12,93%
7	117,26	118,72	-1,25%
8	123,18	118,54	3,76%
9	82,84	82,44	0,49%
10	119,49	117,06	2,03%
11	48,53	54,46	-12,22%
12	97,09	101,83	-4,88%
13	91,8	96,44	-5,06%
14	106,34	96,75	9,02%
15	74,21	82,85	-11,64%
16	61,39	54,75	10,82%

Tableau III-16: Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de  $(F_y)$ .



**Figure III-48 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fy.

L'analyse de la figure (III-48) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs

### III.4.5 Modèle de l'effort de coupe (Fz) en fonction des paramètres de coupe :

#### III.4.5.1 Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel (Fz) :

Le (Tableau III-17) qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la composante tangentielle de l'effort (Fz).

CC650WG								
Source	DL	Som Car séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
<b>Modèle</b>	9	18232,7	97,81	18232,7	2025,85	29,82	0,000	<b>Significatif</b>
<b>vc</b>	1	161,9	0,87	234,8	234,84	3,46	0,112	<b>N significatif</b>
<b>f</b>	1	4557,2	24,45	927,0	927,01	13,65	0,010	<b>Significatif</b>
<b>ap</b>	1	11599,3	62,23	5609,5	5609,50	82,58	0,000	<b>Significatif</b>
<b>vc*vc</b>	1	9,8	0,05	4,3	4,34	0,06	0,809	<b>N significatif</b>
<b>f*f</b>	1	14,7	0,08	14,7	14,75	0,22	0,658	<b>N significatif</b>
<b>ap*ap</b>	1	320,9	1,72	320,9	320,95	4,72	0,073	<b>Significatif</b>
<b>vc*f</b>	1	697,8	3,74	485,6	485,63	7,15	0,037	<b>Significatif</b>
<b>vc*ap</b>	1	113,4	0,61	113,4	113,40	1,67	0,244	<b>N significatif</b>
<b>f*ap</b>	1	757,6	4,06	757,6	757,58	11,15	0,016	<b>Significatif</b>
<b>Erreur</b>	6	407,6	2,19	407,6	67,93			
<b>Total</b>	15	18640,3	100,00					

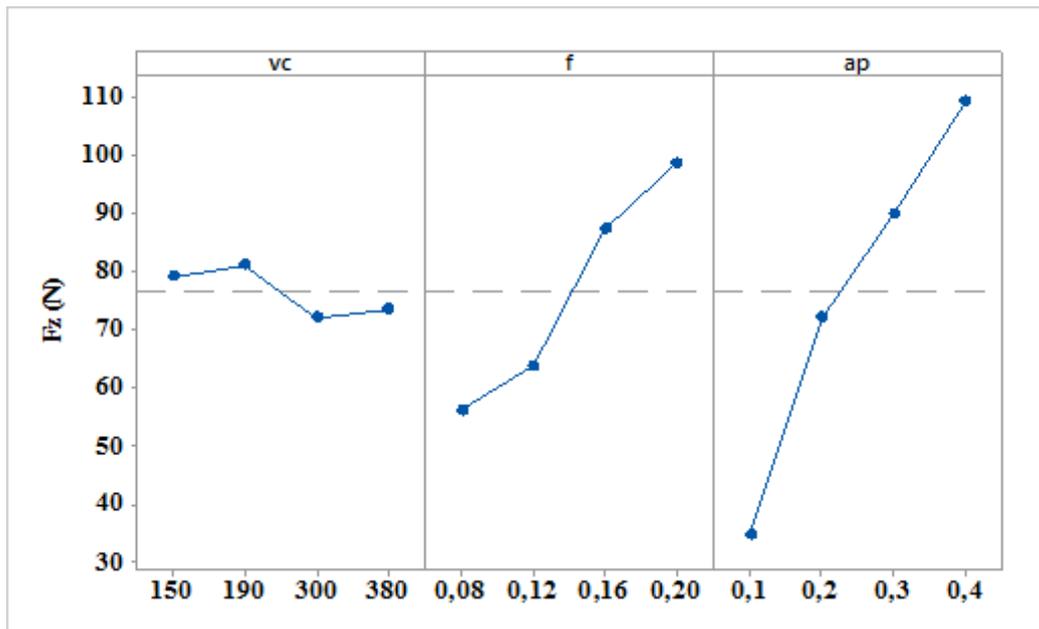
**Tableau III-17:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel (Fz) .

L'analyse de la variance (ANOVA) (Tableau III-17) montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 62,23% suivi par l'avance (f) avec une contribution 24,45% et en dernier lieu vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 0,87%.

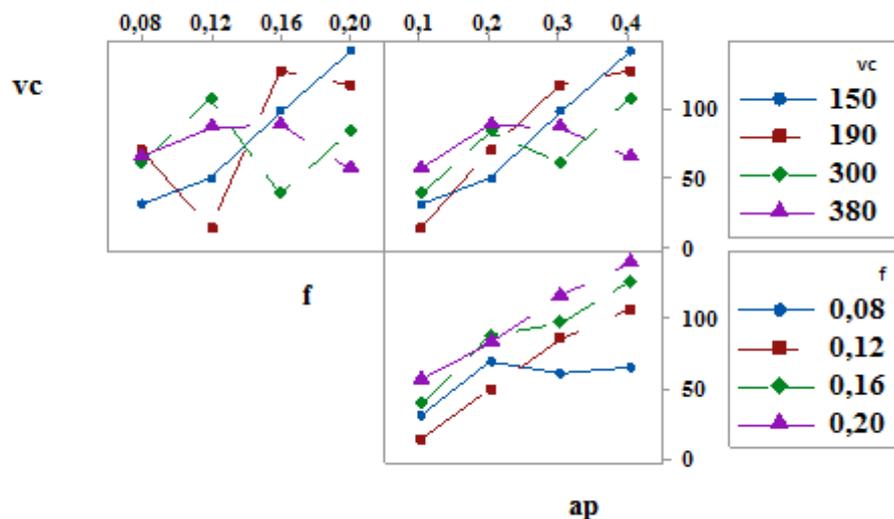
**III.4.5.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :**

La figure (III-49) présente les effets principaux des facteurs considérés : l'avance par tour et la profondeur de passe sur l'effort de coupe (Fz).

Nous remarquons que la profondeur de passe (ap) et l'avance (f) sont les facteurs les plus influents sur l'effort de coupe (Fz) car il a la plus grande pente. La Vitesse de coupe affecte peu sur l'effort de coupe (Fz).



**Figure III-49 :** Graphe des effets principaux de Vc, f et ap sur l'effort de coupe (Fz)

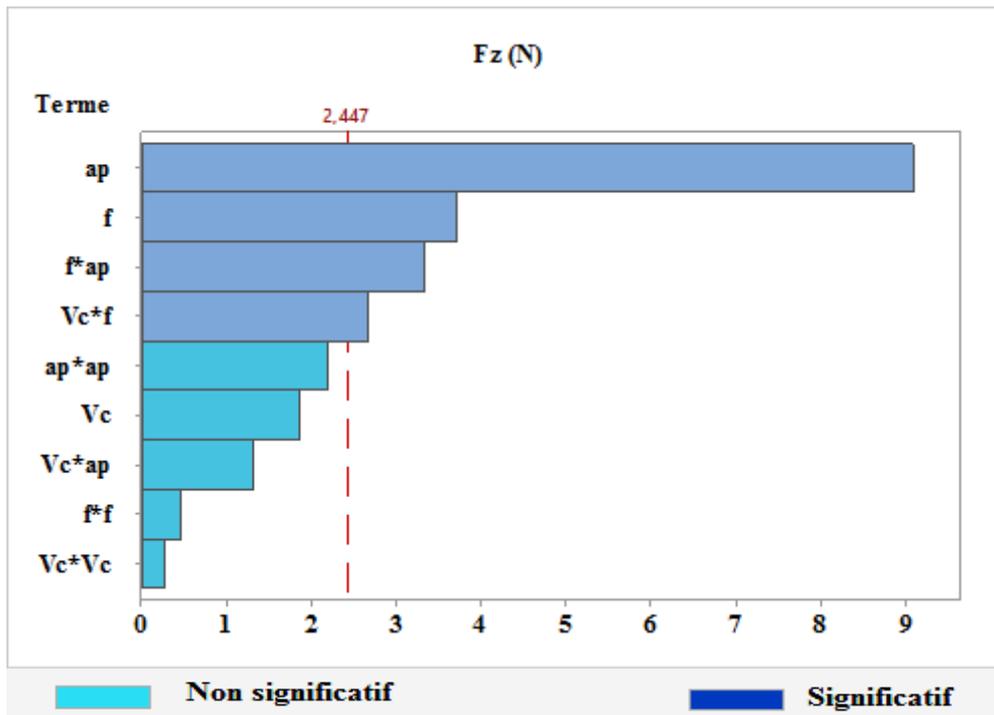


**Figure III-50 :** Diagramme d'interaction pour Fz

La figure (III-50) représente le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur Fz. Cette figure montre que nous avons des interactions entre les paramètres de coupe.

### III.4.5.3 Facteurs influents (Graphe de Pareto) :

L'analyse de graphe de Pareto (**Figure III-51**) nous permet de distinguer les paramètres et les interactions qui ont un effet significatif sur la réponse. Les paramètres les plus influents sur l'effort tangentiel sont la profondeur de passe, l'avance par tour et l'interaction entre l'avance et la profondeur de passe. La contribution de la vitesse de coupe est négligeable ainsi que ses interactions.



**Figure III-51** : Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort (Fz).

### III.4.5.4 Analyse de régression (Fz) en fonction de (Vc ; f et ap) :

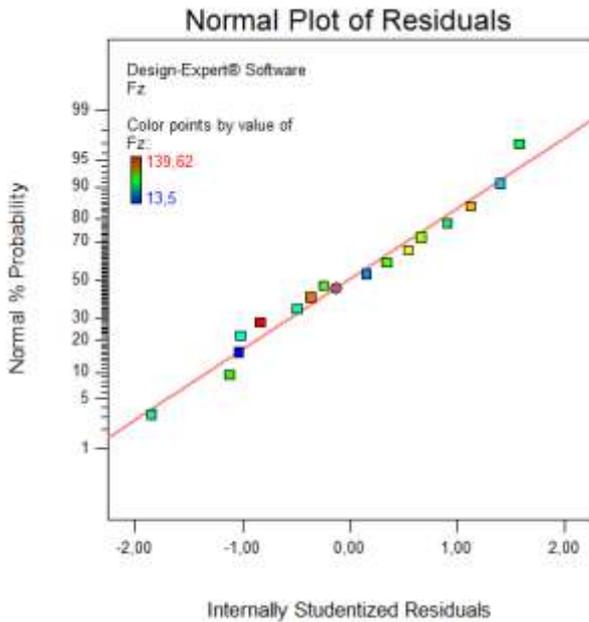
Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

Equation de régression en unités non codées

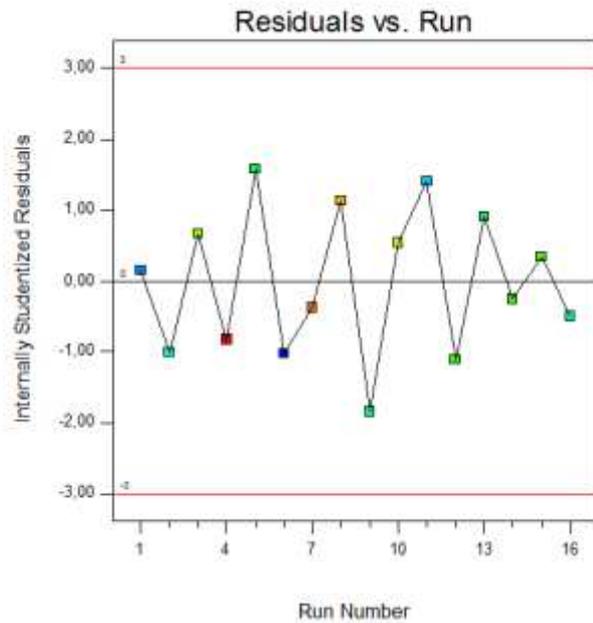
$$Fz_{CC650WG} = 62,8 - 0,097 v_c - 1112 f + 320 a_p - 0,000103 v_c*v_c + 600 f*f - 448 a_p*a_p + 2,462 v_c*f - 0,476 v_c*a_p + 2423 f*a_p.$$

$$R^2_{CC650WG} = 97,81\%, \quad Adj R^2_{CC650WG} = 94,53\%, \quad Pred R^2_{CC650WG} = 83,59\%.$$

**III.4.5.5 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**



**Figure III-52:** courbe de normalité pour Fz.

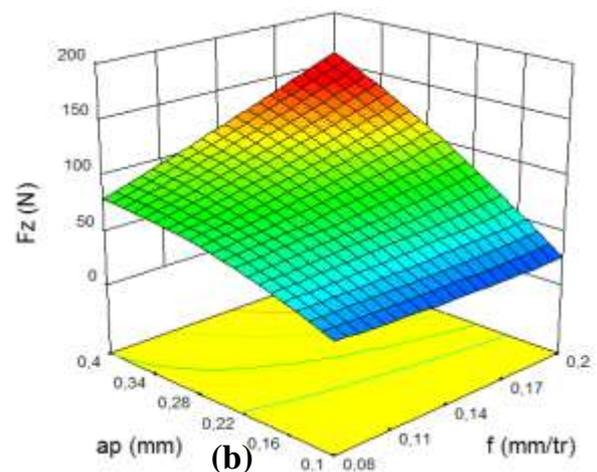
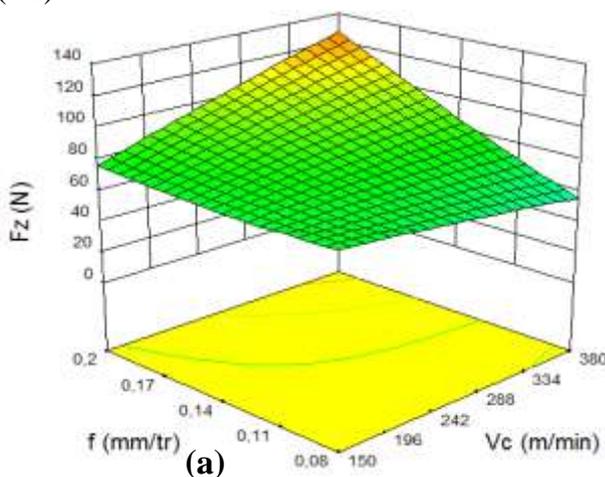


**Figure III-53:** courbe des résiduels pour Fz.

D’après les graphiques de distribution de l’erreur on remarque que dans le cas de la transformation Box-Cox les points sont plus proches de la droite, ce qui signifie une meilleure normalité de la distribution de l’erreur.

**III.4.5.6 Diagrammes de surfaces 3D de (Fz):**

La figure (III-54 a, b, c) permet d’évaluer l’influence simultanée de (f;Vc), (ap ;f) et (ap;Vc) sur le composante de l’effort de coupe (Fz), montres que la pente de la profondeur de passe (ap) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l’effort de coupe (Fz), suivi par l’avance (f) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (Vc) .



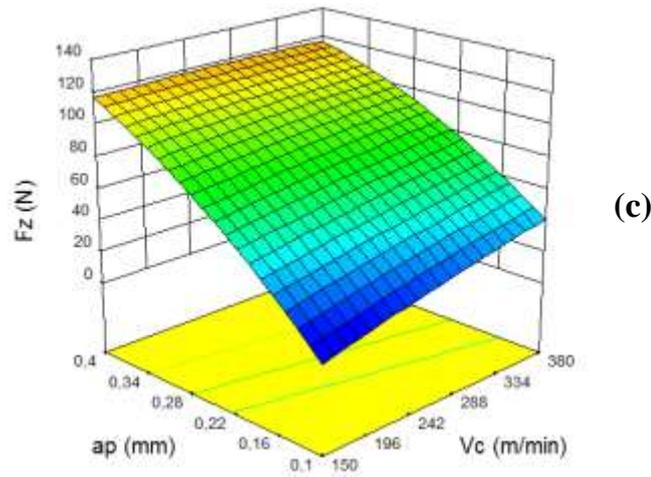


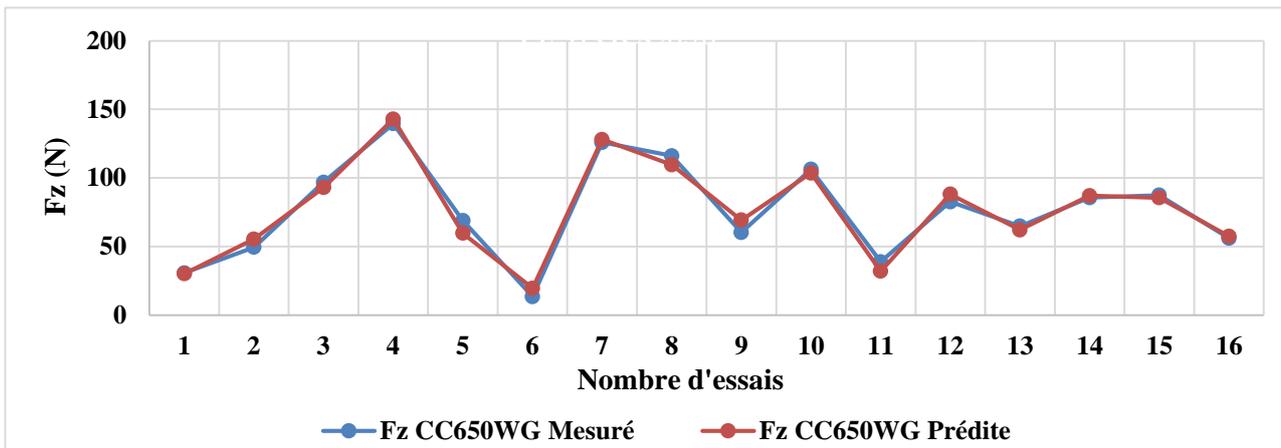
Figure III-54: Diagrammes de surface 3D de ( $F_z$ ) en fonction de ( $V_c$  ;  $f$  ;  $a_p$ )

#### III.4.5.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites :

Le (Tableau III-18) montre le pourcentage d'erreur entre la valeur mesurée et prédite pour chaque essai. L'analyse du (Tableau III-18) montre que le pourcentage d'erreur minimale est obtenu avec le régime 14.

Essais	Fz CC650WG mesuré	Fz CC650WG prédite	L'erreur
1	30,7	30,09	2,00%
2	49,43	55,34	-11,95%
3	96,84	92,94	4,03%
4	139,62	142,89	-2,34%
5	68,85	59,65	13,37%
6	13,5	19,48	-44,32%
7	125,93	128,04	-1,68%
8	116,21	109,63	5,66%
9	60,33	69,28	-14,83%
10	106,29	103,63	2,50%
11	38,8	31,95	17,64%
12	82,64	88,06	-6,56%
13	64,81	62,15	4,11%
14	85,67	87,03	-1,59%
15	87,45	85,49	2,24%
16	56,11	57,53	-2,53%

Tableau III-18 : Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de  $F_z$ .



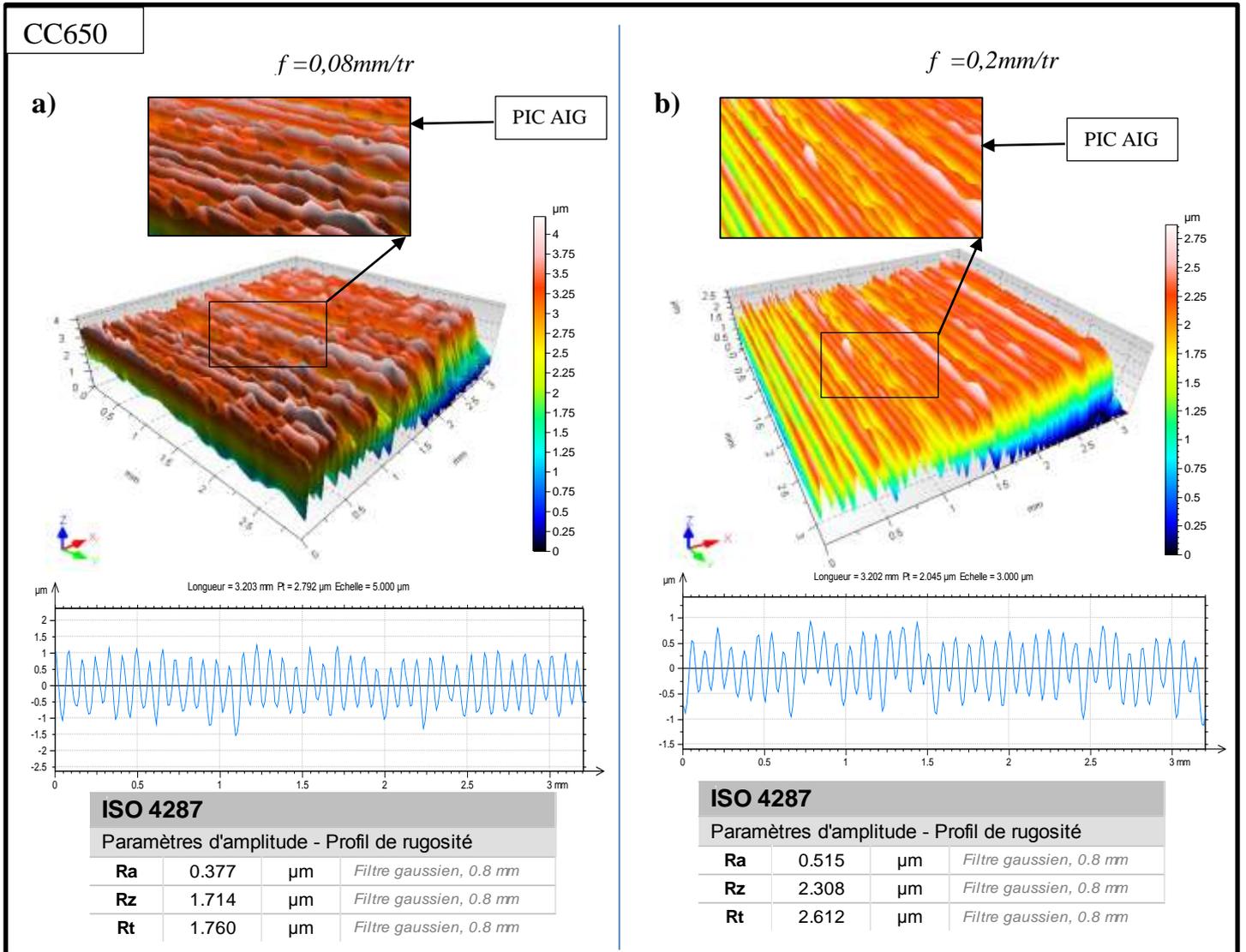
**Figure III-55 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Fz.

L'analyse de la (Figure III-55) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

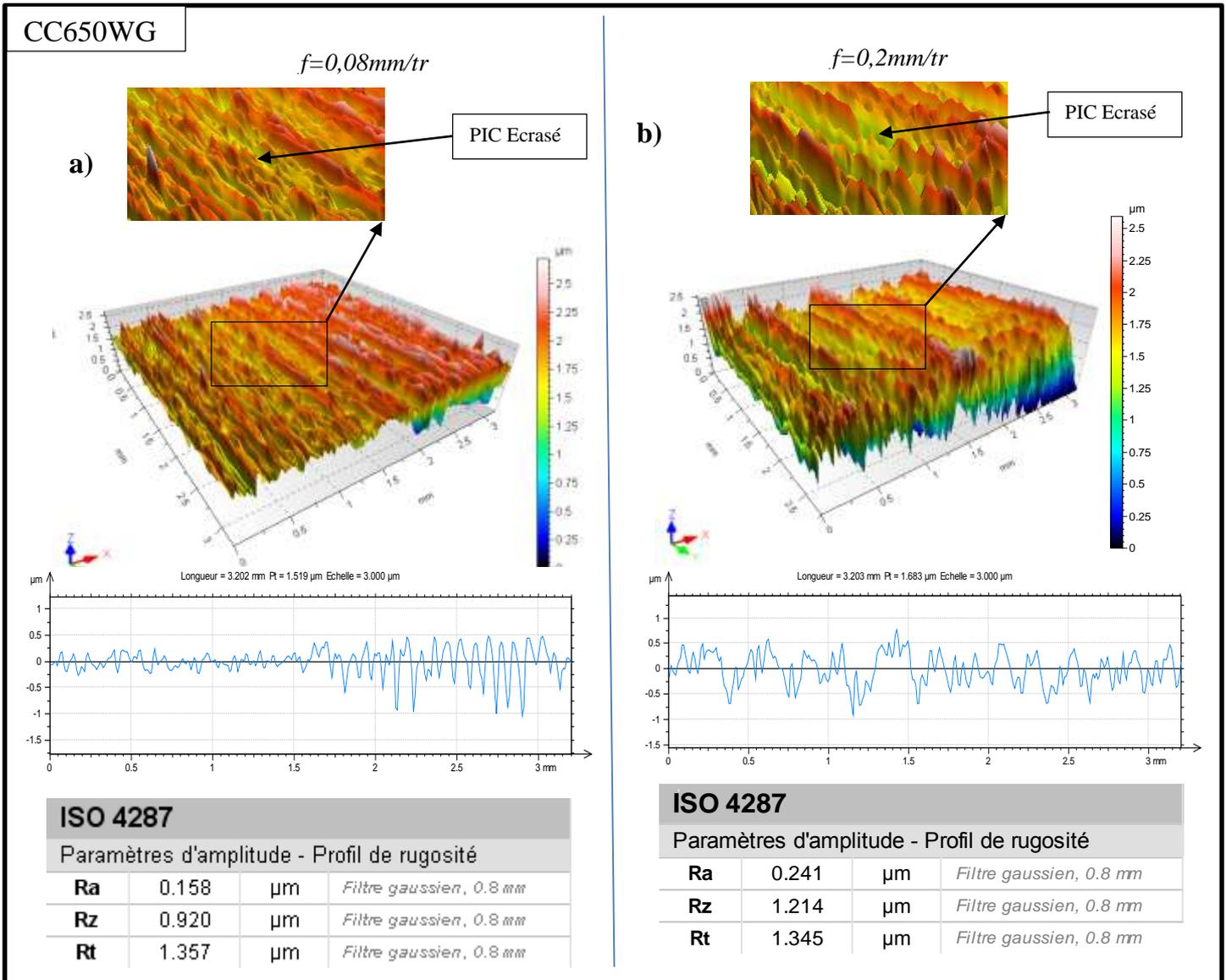
### III.5 Topographie des surfaces en 3D :

Les exemples représentatifs des topographies en 3D des surfaces usinées lors de tournage dur de l'acier 100Cr6, sont visualisés sous forme isométrique. Les figures (III-56) et (III-57) montrent deux formes de pics, l'un aigu qui est obtenue par la céramique conventionnelle CC650, l'autre platier (écrasé) qui est obtenu par la céramique Wiper CC650WG.

Les figures (III-56) et (III -57) montrent les profils de surface en 2D usinées suivant la direction de l'avance. L'analyse des résultats des profils en 2D selon la longueur de la direction d'avance pendant l'usinage par la céramique CC650 présente des formes cycliques de crêtes et de creux (Figures III-56). Tandis que le profil selon la longueur de la direction de l'avance pour la céramique Wiper et CC650WG présente des cycles aléatoires (Figures III-57).



**Figure III-56:** Topographie en 3D de l'état de surface pendant le tournage dur de l'acier 100Cr6 avec la céramique CC650 pour  $V_c = 190 \text{ m/min}$  et  $a_p = 0,20 \text{ mm}$ ; a)  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et b)  $f = 0,2 \text{ mm/tr}$ .



**Figure III-57 :** Topographie en 3D de l'état de surface pendant le tournage dur de l'acier 100Cr6 avec la céramique conventionnelle Wiper CC650WG pour  $V_c = 190\text{m/min}$  et  $a_p = 0,20\text{ mm}$  ; a)  $f = 0,08\text{ mm/tr}$  et b)  $f = 0,2\text{ mm/tr}$ .

### III.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux connaître le degré d'influence des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) sur les différents paramètres technologiques étudiés (rugosité de la surface usinée et efforts de coupe) lors de l'usinage de l'acier de haute dureté (100Cr 6) avec deux type de plaquettes, une en céramique conventionnelle CC650 et l'autre en Wiper CC650WG.

Ces modèles présentent une grande importance économique dans le milieu industriel, car ils permettent de prédire les paramètres technologiques étudiés et aussi d'optimiser le processus de coupe.

## Conclusion Générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier 100 Cr6 traité à 60 HRC usiné en tournage dur à sec par les céramiques de coupe suivantes : céramique en Wiper CC650WG et la céramique conventionnel CC650 nous a permis d'étudier les performances de ces outils de coupe en termes d'efforts de coupe et la rugosité de surface usinée. Le traitement des résultats consiste en une analyse de variance (ANOVA) avec la méthode de Taguchi.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- D'après l'étude comparative entre les deux plaquettes de coupe en céramique, il ressort que la céramique de la géométrie Wiper (CC650WG) présente des performances supérieures à celles céramique testée (CC650), en termes d'effort de coupe et rugosité de surface.
- Les résultats montre que les états de surfaces usinées par la plaquette céramique Wiper (CC650WG) sont meilleurs que ceux obtenus par l'autre plaquette (CC650) et cela pour toutes les conditions de coupe testées (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe).
- Les courbes de la rugosité 3D pour les critères (Ra, Rz et Rt) et obtenus par la plaquette céramique en Wiper est très inférieure a ceux de céramique non Wiper pendant les essais, les ratios (Ra CC650= 3,25 Ra CC650WG), (Rz CC650= 2,50 Rz CC650WG), (Rt CC650= 1,92 Rt CC650WG).
- Les plaquettes râcleuses, aussi appelées Wiper, sont conçues pour "adoucir" les stries laissées sur les surfaces tournées. En fait, elles améliorent le fini de surface. Comparé au tournage avec des plaquettes standard, le tournage avec des plaquettes Wiper peut améliorer le fini de surface par un facteur plus de deux, ou bien assurer le maintien d'un fini constant en usinant avec une avance plus deux fois plus grande. Pour conclure, elles permettent d'accroître la qualité ou la productivité.
- La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites pour chaque essai montre qu'il y a une bonne corrélation entre les deux valeurs.
- Le traitement statistique des résultats des essais ont abouti à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe et de la rugosité de surface. L'analyse de la variance (ANOVA) nous a permis de déterminer les facteurs qui ont un impact significatif sur les différents phénomènes étudiés.
- L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ra) montre pour la céramique conventionnel CC650 que l'avance (f) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 72,34% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 20,56% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante ,avec  $R^2=94,51\%$ . L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique Wiper CC650WG, montre la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus significatif avec une contribution de

59,06% suivi par l'avance (f) avec une contribution de 35,36% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante, avec  $R^2=98,05\%$ .

- L'analyse ANOVA de l'effort de coupe ( $F_x$ ) pour la céramique conventionnel CC650 montrent que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 55,07%, avec  $R^2=95,56\%$ . L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique Wiper, montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 61,10%, avec  $R^2=95,96\%$ .
- L'analyse ANOVA de l'effort de coupe ( $F_y$ ) pour la céramique conventionnel CC650 montrent que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 54,16%, avec  $R^2=90,39\%$ . L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique Wiper, que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 76,40%, avec  $R^2=96,73\%$ .
- L'analyse ANOVA de l'effort de coupe ( $F_z$ ) pour la céramique conventionnel CC650 montrent que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 56,20%, avec  $R^2=95,86\%$ . L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique Wiper, que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 62,23%, avec  $R^2=97,81\%$ .

### **Perspectives**

Ce travail ouvre des travaux perspectifs de recherche qui sont :

1. Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe face à l'acier 100cr6.
2. Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres variables tels que : la géométrie de la partie active de l'outil (rayon du bec et l'angle d'attaque).
3. Etudes les vibrations de l'outil et son influence sur la rugosité de surface en tournage dur.

---

---

# Références

---

---

# Références

- [1] **Becir K.**, Etude de l'usinage des aciers trempés avec des outils en nitrure de bore cubique, Thèse de magister, Université de Annaba 1992.
- [2] **Gonthier J.R.**, Tournage des matières trempées, Marchés systèmes management, N° 9, 27 août 1998.
- [3] **CARSTEN S.**; Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting, Institute of Machine Tools and Production Science University of Karlsruhe (2003), pp.22.
- [4] **Poulachon G.**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, 1999.
- [5] **Hug J. L.**, Tournage des métaux durs, Machine de production, N° 110 pp 17-19,1995.
- [6] **M.A. Yallese**, Etude du Comportement a l'Usure des Matériaux de Coupe Modernes en Tournage Dur, Thèse Doctorat, Université d'Annaba, 2005.
- [7] **M. Habak**, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, ENSAM d'Angers, Déc. (2006).
- [8] **M.A. Yallese**, Etude du Comportement a l'Usure des Matériaux de Coupe Modernes en Tournage Dur, Thèse Doctorat, Université d'Annaba, 2005.
- [9] **Bedrin C.**, Roumesy B., Usinage par outil coupant, Fascicule 1-2, INSA-Lyon, 1989.
- [10] **DJOUIMA Abdennour** ; Modélisation et Optimisation de l'usure des outils céramique et la rugosité de surface de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes MSR, RNA et Taguchi, Université de Guelma, 2017
- [11] ]<https://www.memoireonline.com/07/09/2326/Etude-des-efforts-de-coupe-et-de-la-rugosite-lors-de-lusinage-du-PE80-.html>
- [12] **François BAGUR**, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, BM7 080 – 1
- [13] Fabrication mécanique, licence et technologie et mécanique, Université de la Réunion <http://tice2.univ-reunion.fr>
- [14] **G. Taguchi**, Taguchi on Robust technology development methods, ASME Press, New York, pp. 1– 40, (1993).

[15] **M. Pillet**, Les plans d'expériences par la méthode Taguchi, 3ième édition, Paris, France, (2005).

[16] **S. Chinchankar, S. K. Choudhury**, Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel:

[17] **Bruni C, Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M.** Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, pp. 1547–1554(2006).

[18] **Senthil k, Raja D, Sornakumar T.**The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 173, pp. 151–156(2006).

[AOU 16] **H. Aouici 1,2 & M. Elbah1,2 & M. A. Yallese1 & B. Fnides1,3 & I.Meddour1,2 & S. Benlahmidi2** Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: analysis of machining forces and flank wear(2016)

[Add 15] **D.M. D'Addonaa\*, Sunil J Raykarb** Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry 48th CIRP Conference on MANUFACTURING SYSTEMS - CIRP CMS 2015.

[GAI 08]: **V.N. Gaitonde a,\* , S.R. Karnik b,1 , Luis Figueira c , J. Paulo Davim c,2** ;Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts

[GUN 13] **M. Gunay, E. Yucel**, Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron, Measurement, 46, pp. 913–919, (2013).

[PAI 11] **A.P. Paiva, P.H. Campos, J.R. Ferreira, L.G.D. Lopes, E.J. Paiva, P.P. Balestrassi** ; A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool (2011)

[PEI 16] **Peirong Zhang, Zhanqiang Liu**; Modeling and prediction for 3D surface topography in finish turning with conventional and wiper inserts Available online 27 July 2016