

Optimisation de la rugosité des surfaces fraisées

W. Bouzid

Laboratoire de Corrosion et Protection des Métalliques,
ENIT, BP 37 Le belvédère, 1002 Tunis, Tunisie.

A. Zghal

Laboratoire de Mécanique des Solides, de calcul des Structures et des Développements Technologiques,
ESSTT, 5 Avenue Taha Houssein, 1008, Monfleury, Tunis

L. Saï

Laboratoire de Mécanique des Solides, de calcul des Structures et des Développements Technologiques,
ESSTT, 5 Avenue Taha Houssein, 1008, Monfleury, Tunis

Résumé

L'objectif de cette étude est d'optimiser les paramètres de coupe permettant de réduire la rugosité des surfaces fraisées. Deux nuances de matériaux ont été étudiées : un acier au carbone et un acier inoxydable austénite ferritique (duplex).

En fraisage en bout, un plan complet d'expérience a permis de déduire que le travail en avalant donne le meilleur état de surface. Cependant, pour ce type de fraisage, un plan fractionnaire utilisant la table de Taguchi L25 (5^3) a été utilisé pour déduire pour chacune des deux nuances, la combinaison de paramètres permettant de minimiser la rugosité arithmétique moyenne R_a et la hauteur maximale de rugosité R_t . De même, des modèles empiriques ont été mis en place pour exprimer les paramètres de rugosité en fonction de l'avance, de la profondeur de passe et de la vitesse de coupe. La comparaison des différentes méthodes a montré une bonne cohérence entre les différents résultats.

Abstract

The aim of this paper is to optimise cutting parameters which permit to minimize the roughness of milled surfaces. Two different steels have been studied : a carbon steel and a duplex stainless steel.

In milling in tip, an experimental design system has permitted to deduct that milling while swallowing, for the used values of cutting speed (V_c), of feed (f_z) and of cutting depth (p), gives small values of roughness. However, for this kind of milling, an optimal combination of cutting parameters, giving the best roughness, has been found when using a Taguchi fractional array L25(5^3), organized of 3 parameters (V_c , f_z , p). Each parameter has five levels. An analytic model has been defined to determine the roughness for all combination of cutting parameters. So good correlation with the model and the Taguchi optimization was found based on experimental values of the roughness.

1. INTRODUCTION

Actuellement, l'usinage par enlèvement de copeaux reste encore le procédé le plus répandu, malgré l'apparition de techniques nouvelles telles que le laser, l'électroérosion ou le jet d'eau. Le fraisage, est l'un des procédés les plus souvent utilisés dans l'obtention des pièces mécaniques. En effet, il est caractérisé par la flexibilité, la simplicité des opérations et de la gamme d'usinage, ainsi que par le

faible prix de revient de fabrication d'une pièce. Cependant l'optimisation des paramètres de coupe s'avère nécessaire afin d'améliorer la qualité des surfaces usinées. Dans cet esprit, ce travail a pour objectif d'analyser l'état des surfaces fraisées à travers la rugosité. Deux nuances d'acier ont été étudiées : un acier au carbone (0,38% C) et un acier inox austénite - ferritique (0,02% C). L'acier duplex est utilisé dans la fabrication des pompes de circulation d'eau de mer des centrales thermiques de production d'électricité qui sont des structures sollicitées à des conditions relativement sévères liées essentiellement à la présence d'eau de mer. Les défaillances généralement déclarées sont en relation avec des problèmes de corrosion localisée. Malgré que les aciers inoxydables austénite ferritiques sont les meilleurs candidats vu leur excellente résistance à la corrosion localisée, les caractéristiques des surfaces [1] qui sont généralement générées mécaniquement ont une influence importante sur la résistance à la corrosion [2,3,4]. En effet, les conditions d'usinage peuvent fortement influencer la tenue en service d'une pièce mécanique soumise à des contraintes, modifient la structure, la dureté, l'état de surface [5,10] et engendrent des contraintes résiduelles [1]. Cependant, il est important d'attirer l'attention sur les caractéristiques d'une pièce après l'usinage pour en tenir compte dans le choix des paramètres de coupe. Comme l'état de surface est un critère important pour les surfaces fonctionnelles des pièces mécaniques, plusieurs études et développements du procédé d'usinage sont faits dans les cas de tournage, fraisage et perçage [1,5,6]. En fraisage, plusieurs paramètres sont influant : le mode de fraisage (en opposition ou en avalant), la vitesse de coupe V_c (m/min), l'avance f_z (mm/tr/dent), la profondeur de passe p (mm), la lubrification, l'affûtage de l'outil et la rigidité de la machine. Le problème présenté est complexe car plusieurs paramètres peuvent varier à la fois et sont susceptibles d'influer sur la performance du système étudié qui est caractérisé par une ou plusieurs réponses. Pour la résolution, on est toujours amené à réaliser des essais. Par exemple, pour n paramètres à k niveaux chacun, il faut k^n essais, ce qui impose un nombre important d'essais. La méthode des plans d'expériences [11] est utilisée dans cette étude car elle permet assez facilement d'introduire de la rigueur dans les campagnes d'essais. L'interprétation des résultats est facile et la précision est meilleure. Cependant, le nombre d'essais est très réduit en utilisant les tables de Taguchi [11]. Dans ce travail, les essais expérimentaux doivent permettre de développer des modèles linéaires relatifs à la variation de la rugosité arithmétique moyenne R_a et de la hauteur maximale de rugosité R_t en fonction des trois paramètres les plus influants qui sont la vitesse de coupe V_c (m/min), l'avance f (mm/tr) et la profondeur de passe p (mm). La rugosité est exprimée en fonction des effets et des interactions entre les différents paramètres. Ces mêmes modèles ont conduit à la détermination de la combinaison qui donne les valeurs minimales de R_a et R_t . Les essais doivent permettre également de mettre en place des modèles analytiques exprimant ces paramètres de rugosité en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de la profondeur de passe.

2. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

2.1 Outil

L'outil utilisé est une fraise « Sandvik » à plaquettes amovibles en carbure métallique, de nuance M15. Cette nuance de carbure est revêtue et conçue pour le fraisage léger de l'acier inoxydable. La désignation de la plaquette est R245-12T3E-ML. Elle comprend un plat de planage (figure 1) permettant d'obtenir des rugosités de valeurs faibles et comparables aux résultats de rectification. Le porte plaquette a pour désignation R245-050Q22-12L. Il a un diamètre $D_c=50$ mm et un nombre de dents $z=3$ (figure 1).

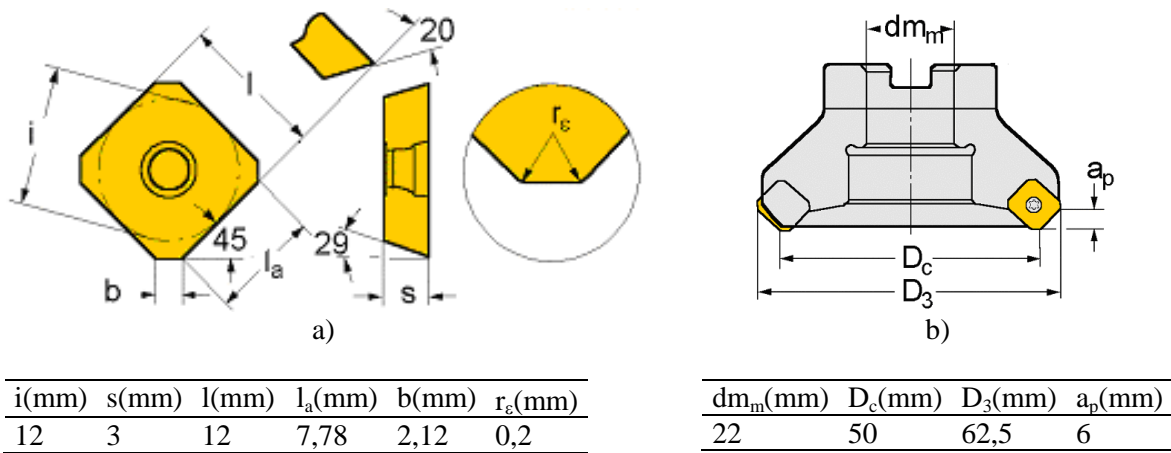


Figure1 : Géométrie de l'outil,
 a) Géométrie d'une plaquette ;
 b) Géométrie du porte plaquettes

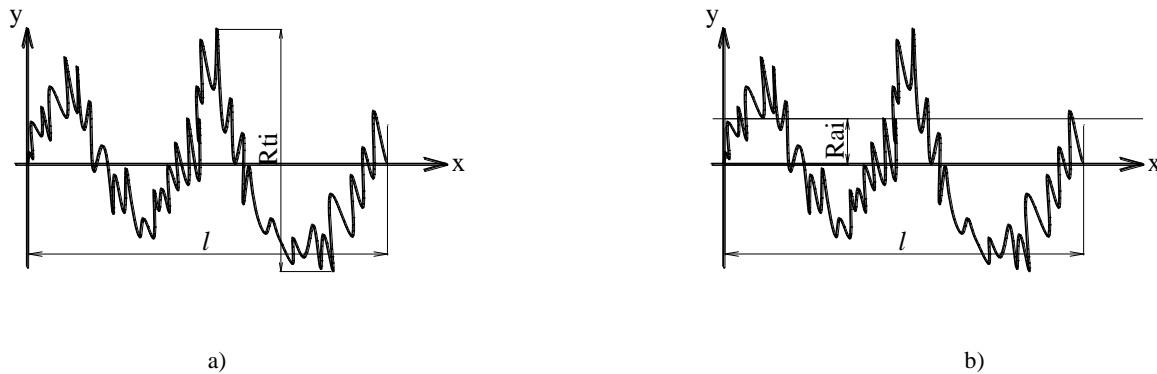


Figure 2 : Paramètres R_a et R_t de rugosité

a) Hauteur maximale du profil de rugosité : R_t - Sur L : $R_t = \max (R_{ti}) (1 < i < L/l)$

b) Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité : R_a - Sur l : $R_{a_i} = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$ - Sur L : $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} R_{a_i}$

2.2 Rugosimètre

Le rugosimètre utilisé est de type : MITUTOYO SURFTEST SJ201. Les paramètres de mesure sont résumés dans le tableau 1.

	R_a	R_t
Précision	0,08 μm	2,06 μm
Répétabilité	0,02 μm	0,5 μm
Longueur d'évaluation	12,5 mm	
Longueur de base	2,5 mm	
Vitesse de mesure	1 mm/s	
Pointe du diamant	Rayon 5 μm -angle 90°	

Tableau 1 : Paramètres de mesure de la rugosité

Les paramètres étudiés dans ce travail sont la hauteur totale de rugosité R_t et l'écart moyen arithmétique du profil de rugosité R_a . R_a est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts y_i par rapport à la ligne moyenne. R_t est la somme de la hauteur de la saillie la plus haute et de la profondeur du creux le plus bas sur la longueur d'évaluation (figure 2).

2.3 Matériaux

Deux nuances d'acier ont été étudiées, un acier inoxydable austénite-ferritique (duplex) (figure 3) de la deuxième génération (Z2CNDU25-7Az) et un acier au carbone (XC38). Les différentes pièces ont subi initialement un recuit de normalisation. Les microduretés en cœur, à une charge de 200g de l'acier au carbone et de l'acier duplex sont respectivement de l'ordre de 170 HV et 350 HV.

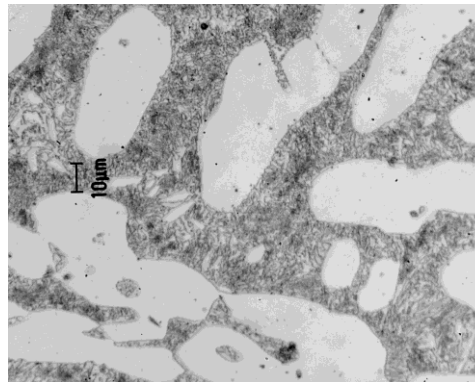


Figure 3 : Microstructure de l'acier duplex

La composition chimique de chacun des deux matériaux est donnée dans le tableau 2.

	C_{max}	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N
Acier duplex	0,02	0,62	0,49	7,43	24,6	2,81	2,52	0,16
Acier au carbone				P	S			
min	0,35	0,15	0,5	-	-			
maxi	0,4	0,35	0,8	0,03	0,035			

Tableau 2 : Composition (% massique) des deux nuances d'acier.

2.4 Essais effectués

Les paramètres mis en jeu dans cette étude sont le mode de fraisage (en opposition ou en avalant) (figure 4), la vitesse de coupe V_c (m/min), l'avance par dent f_z (mm/tr/dent) et la profondeur de passe p (mm). Les surfaces usinées sont de dimensions 20x20 mm², ce qui permet de travailler entièrement en avalant ou en opposition du fait que la surface usinée peut être positionnée du même côté de l'axe de la fraise. L'influence de l'usure de l'outil sur la rugosité est supposée négligeable, vue que, par essai, un outil neuf a été utilisé. Deux campagnes d'essais ont été mises en place :

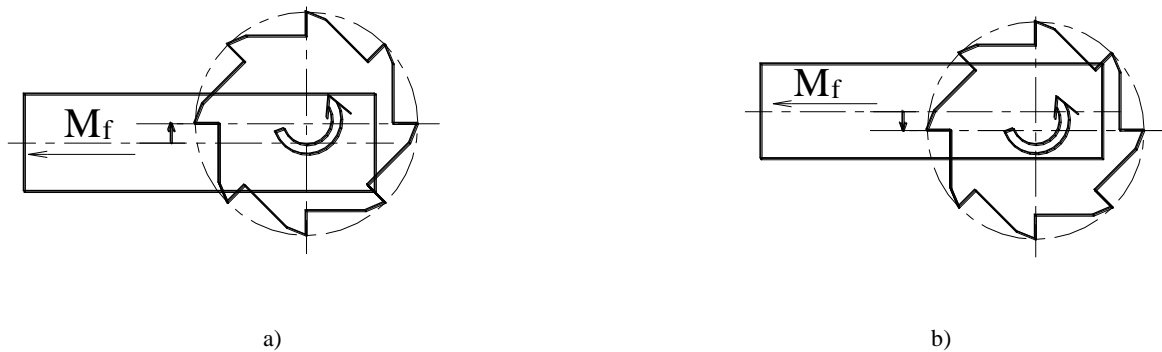


Figure 4 : Les deux modes de fraisage en bout.
a) en opposition
b) en avalant

- Une première, pour choisir le mode de travail en opposition ou en avalant et pour identifier les modèles d'évolution de R_a et de R_t en fonction des différents paramètres. La vitesse et l'avance sont variables et prennent cinq niveaux différents chacun. Cependant, 25 essais ont été effectués. On a analysé pour les deux modes de fraisage de finition ($p=0,5$ mm), l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe.

- Une deuxième, pour optimiser les paramètres de coupe. On a utilisé un plan fractionnaire constitué de la table de Taguchi $L_{25}(5^3)$. Les niveaux des différents paramètres ont été recommandés par le fabricant d'outils (tableau 3).

Paramètre/ Niveau	1	2	3	4	5
V_c (m/min)	78	111	157	219	314
f_z (mm/tr/dent)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,28
p (mm)	0,1	0,5	1	1,5	2

Tableau 3 : Matrice des niveaux.

Les différents essais effectués sont résumés dans le tableau 4. Les paramètres de coupe prennent cinq niveaux différents chacun. $V_c f_z$, $V_c p$ et $f_z p$ représentent les interactions entre les paramètres pris deux à deux.

Essai	V_c	f_z	p	$V_c f_z$	$V_c p$	$f_z p$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	1	5	4
25	5	5	4	3	2	1

Tableau 4 : Table de Taguchi $L_{25}(5^3)$.

3. RESULTATS

3.1 Choix du mode de fraisage

Pour les 25 essais effectués, les courbes des figures 5 et 6 montrent que le fraisage en avalant donne des valeurs de R_a et R_t plus faibles que le fraisage en opposition malgré qu'en fraisage en avalant, l'effort de coupe a tendance à séparer la pièce des surfaces d'appui liées à la machine. Le résultat obtenu est du d'une part aux faibles efforts de coupe pour la profondeur de passe utilisée et d'autre part au fait qu'en fraisage en avalant, l'outil passe plusieurs fois sur un même point de la surface. On retiendra le mode de fraisage en avalant pour la suite des essais.

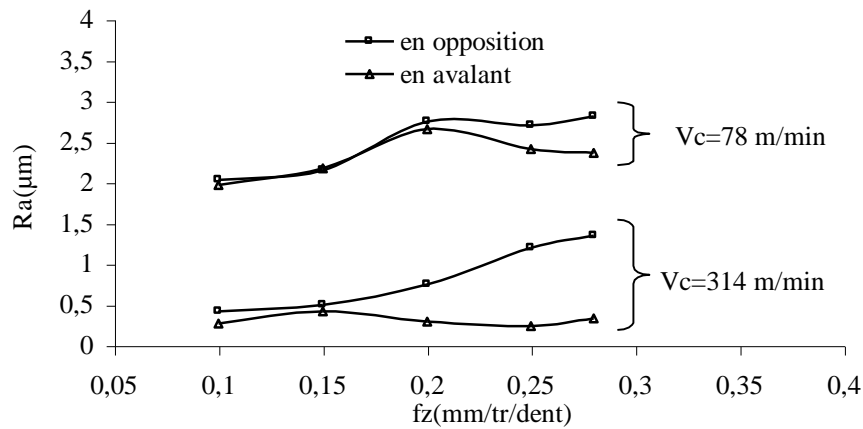


Figure 5: Variation de R_a en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance pour les deux modes de fraisage – acier au carbone - $p=0,5$ mm.

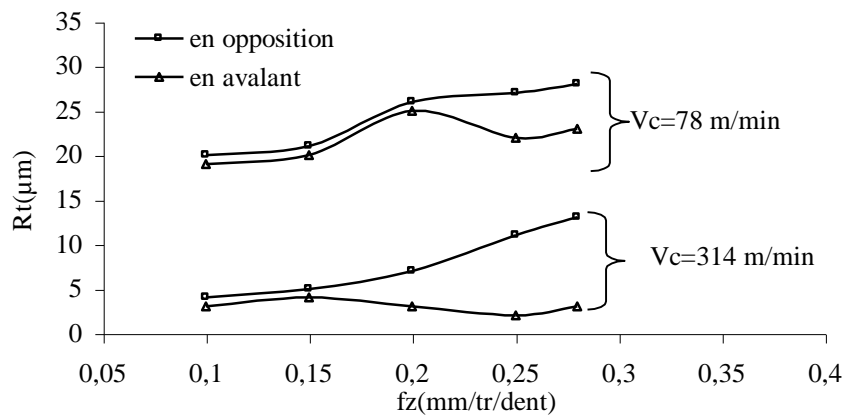


Figure 6: Variation de R_t en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance pour les deux modes de fraisage – acier au carbone – acier au carbone - $p=0,5$ mm.

3.2 Variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Les figures 7 et 8 représentent l'évolution de R_a et R_t en fonction de l'avance par dent et de la vitesse de coupe dans le cas de l'usinage de l'acier au carbone. On remarque que les courbes ont les mêmes allures pour R_a et R_t .

On note une augmentation de la rugosité en fonction de l'avance. Quand la vitesse de coupe est égale à 100 m/min, R_a est égale à 3 μm pour f_z égale à 0,28mm/tr/dent et à 1,8 μm pour f_z égale à 0,1mm/tr/dent.

L'augmentation de la rugosité avec l'avance est due à une augmentation des efforts de coupe qui s'accompagne d'une augmentation des déformations plastiques.

Quant à l'influence de la vitesse de coupe, on remarque que pour des valeurs inférieures à 100 m/min, l'apparition de l'arête rapportée fait augmenter la rugosité.

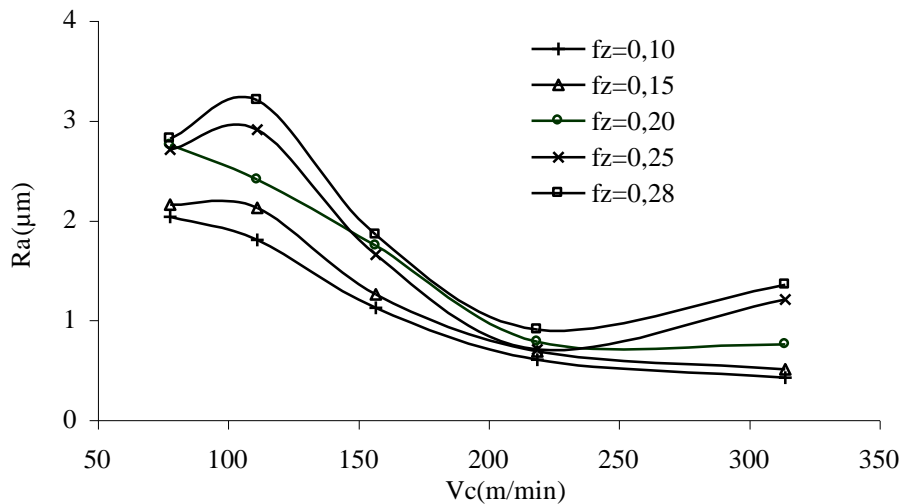


Figure 7: Variation de R_a en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance f_z (mm/tr/dent) – Acier au carbone

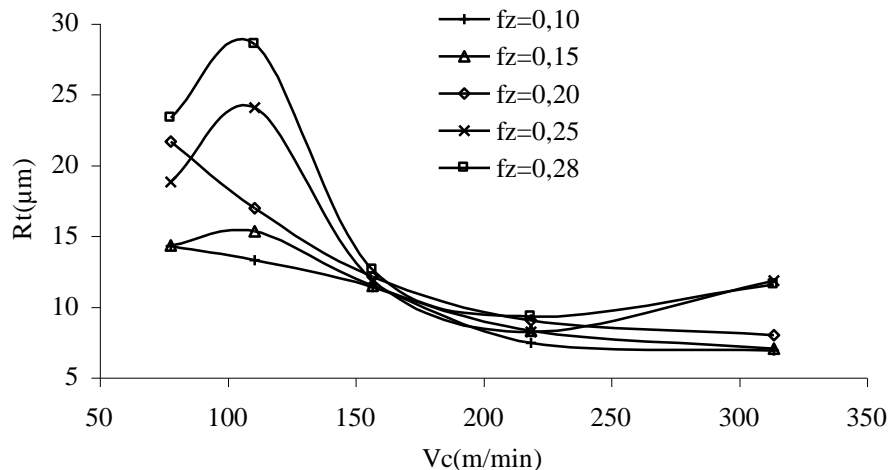


Figure 8: Variation de R_t en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance f_z (mm/tr/dent) – Acier au carbone.

Pour des valeurs de la vitesse de coupe comprises entre 100 et 220 m/min, la rugosité diminue quand la vitesse augmente. Quand la vitesse de coupe augmente, la géométrie du copeau change : la longueur de contact outil-copeau et l'épaisseur du copeau diminuent, l'angle de cisaillement augmente. Cette modification de la géométrie du copeau s'accompagne d'une diminution du coefficient de frottement et par la suite des efforts de coupe et des déformations plastiques à la surface usinée. Ceci entraîne une diminution de la rugosité. Pour des valeurs plus importantes de la vitesse, l'augmentation de la puissance consommée par l'opération de coupe génère de légères vibrations qui ont tendance à faire augmenter la rugosité.

3.3 Optimisation des paramètres de coupe

La réponse théorique en rugosité arithmétique moyenne ou en hauteur maximale de rugosité s'exprime en fonction des effets de chacun des paramètres et des interactions entre les paramètres par :

$$\begin{aligned} \tilde{Y} = & I + [E_{Vc_1} \ E_{Vc_2} \ E_{Vc_3} \ E_{Vc_4} \ E_{Vc_5}](V_c) + [E_{f_{z1}} \ E_{f_{z2}} \ E_{f_{z3}} \ E_{f_{z4}} \ E_{f_{z5}}](f_z) \\ & + [E_{p_1} \ E_{p_2} \ E_{p_3} \ E_{p_4} \ E_{p_5}](p) + \begin{bmatrix} I_{f_{1p1}} & I_{f_{z1p2}} & I_{f_{z1p3}} & I_{f_{z1p4}} & I_{f_{z1p5}} \\ I_{f_{2p1}} & I_{f_{z2p2}} & I_{f_{z2p3}} & I_{f_{z2p4}} & I_{f_{z2p5}} \\ I_{f_{3p1}} & I_{f_{z3p2}} & I_{f_{z3p3}} & I_{f_{z3p4}} & I_{f_{z3p5}} \\ I_{f_{4p1}} & I_{f_{z4p2}} & I_{f_{z4p3}} & I_{f_{z4p4}} & I_{f_{z4p5}} \\ I_{f_{5p1}} & I_{f_{z5p2}} & I_{f_{z5p3}} & I_{f_{z5p4}} & I_{f_{z5p5}} \end{bmatrix} (f_z \ p) \\ & + \begin{bmatrix} I_{V_{c1f_{z1}}} & I_{V_{c1f_{z2}}} & I_{V_{c1f_{z3}}} & I_{V_{c1f_{z4}}} & I_{V_{c1f_{z5}}} \\ I_{V_{c2f_{z1}}} & I_{V_{c2f_{z2}}} & I_{V_{c2f_{z3}}} & I_{V_{c2f_{z4}}} & I_{V_{c2f_{z5}}} \\ I_{V_{c3f_{z1}}} & I_{V_{c3f_{z2}}} & I_{V_{c3f_{z3}}} & I_{V_{c3f_{z4}}} & I_{V_{c3f_{z5}}} \\ I_{V_{c4f_{z1}}} & I_{V_{c4f_{z2}}} & I_{V_{c4f_{z3}}} & I_{V_{c4f_{z4}}} & I_{V_{c4f_{z5}}} \\ I_{V_{c5f_{z1}}} & I_{V_{c5f_{z2}}} & I_{V_{c5f_{z3}}} & I_{V_{c5f_{z4}}} & I_{V_{c5f_{z5}}} \end{bmatrix} (V_c \ f) + \begin{bmatrix} I_{V_{c1p1}} & I_{V_{c1p2}} & I_{V_{c1p3}} & I_{V_{c1p4}} & I_{V_{c1p5}} \\ I_{V_{c2p1}} & I_{V_{c2p2}} & I_{V_{c2p3}} & I_{V_{c2p4}} & I_{V_{c2p5}} \\ I_{V_{c3p1}} & I_{V_{c3p2}} & I_{V_{c3p3}} & I_{V_{c3p4}} & I_{V_{c3p5}} \\ I_{V_{c4p1}} & I_{V_{c4p2}} & I_{V_{c4p3}} & I_{V_{c4p4}} & I_{V_{c4p5}} \\ I_{V_{c5p1}} & I_{V_{c5p2}} & I_{V_{c5p3}} & I_{V_{c5p4}} & I_{V_{c5p5}} \end{bmatrix} (V_c \ p) \end{aligned} \quad (1)$$

\tilde{Y} est la réponse théorique, I la moyenne de toutes les valeurs mesurées, E_{vc1} l'effet moyen de la vitesse de coupe au niveau 1 et I_{vc1fz1} l'interaction vitesse - avance quand V_c est au niveau 1 et f_z au niveau 1.

3.3.1 Optimisation par rapport à R_a ($\tilde{Y} = R_a$)

a) Modèle de R_a

Le modèle linéaire pour l'acier inoxydable s'écrit :

$$\begin{aligned} R_a(\text{duplex}) = & 0,69 + [+0,11 \ -0,05 \ +0,15 \ +0,03 \ -0,23]V_c \\ & + [-0,1 \ -0,09 \ +0,11 \ +0,06 \ +0,02]f_z + [-0,01 \ +0,00 \ 0,00 \ -0,09 \ +0,12]p + \\ & \begin{bmatrix} -0,01-0,09+0,22+0,02-0,12 \\ -0,32+0,29-0,07-0,04+0,14 \\ +0,00-0,28+0,05+0,09+0,12 \\ +0,34-0,04-0,23+0,28-0,19 \\ +0,00+0,12+0,02-0,20+0,05 \end{bmatrix} f_z p + \begin{bmatrix} -0,13+0,18-0,05-0,06+0,07 \\ -0,05-0,02+0,54-0,01+0,03 \\ +0,05-0,29+0,09+0,18-0,03 \\ -0,10+0,23-0,03-0,08-0,01 \\ +0,20-0,10-0,05 \ 0,00 \ -0,06 \end{bmatrix} V_c f + \\ & \begin{bmatrix} -0,21+0,08+0,06+0,09-0,02 \\ +0,06-0,13-0,12+0,26-0,07 \\ +0,25+0,00-0,02-0,30+0,08 \\ +0,09-0,01+0,01-0,10 \ 0,00 \\ -0,20+0,06+0,06+0,05+0,01 \end{bmatrix} V_c p \end{aligned} \quad (2)$$

La valeur minimale de la rugosité pour ce modèle est $R_a(\text{duplex}) = 0,54 \mu\text{m}$.
Le meilleur état de surface est donc obtenu pour l'essai où les paramètres de coupe sont la vitesse de coupe V_c au niveau cinq : $V_c = 314 \text{ m/min}$, l'avance par dent f_z au niveau un : $f_z = 0,1 \text{ mm/tr/dent}$ et la profondeur de passe au niveau quatre : $p = 1,5 \text{ mm}$.

L'essai de confirmation a donné une valeur de R_a égale à $0,56 \mu\text{m}$. L'écart entre les deux résultats est acceptable et peut être dû à l'hypothèse de linéarité dans l'expression de R_a .

Pour l'acier au carbone, le modèle s'écrit :

$$\begin{aligned}
 R_a(\text{acier au carbone}) = & 0,90 + [0,92 \quad 0,45 \quad -0,26 \quad -0,53 \quad -0,58] V_c + \\
 & [-0,08 \quad -0,04 \quad -0,02 \quad 0,19 \quad -0,03] f_z + [0,02 \quad -0,06 \quad 0,01 \quad 0,06 \quad -0,03] p + \\
 & \begin{bmatrix} +0,97+0,38-0,27-0,58-0,49 \\ -0,61+1,04+0,40-0,39-0,44 \\ -0,61-0,53+0,97+0,39-0,21 \\ -0,22-0,67-0,76+1,08+0,58 \\ +0,50-0,21-0,33-0,50+0,57 \end{bmatrix} f_z p + \begin{bmatrix} +0,05+0,05+0,05+0,22-0,39 \\ -0,12-0,03 \quad 0,0 \quad +0,09+0,05 \\ +0,00-0,06+0,01+0,05 \quad 0,00 \\ +0,01+0,05-0,07-0,20+0,20 \\ +0,05-0,01 \quad 0,00 \quad -0,17+0,13 \end{bmatrix} V_c f_z + \\
 & \begin{bmatrix} -0,04 \quad 0,06 \quad +0,02+0,34-0,39 \\ +0,0 \quad -0,14-0,09-0,07+0,32 \\ +0,22 \quad 0,01 \quad -0,09-0,17+0,02 \\ -0,10+0,04+0,15-0,13+0,04 \\ -0,07+0,02+0,01+0,03 \quad 0,00 \end{bmatrix} V_c p
 \end{aligned} \quad (3)$$

La valeur minimale de la rugosité est $R_a(\text{acier au carbone}) = 0,63 \mu\text{m}$. Elle est obtenue pour l'essai où les paramètres de coupe sont la vitesse de coupe au niveau cinq : $V_c = 314 \text{ m/min}$, l'avance par dent au niveau un : $f_z = 0,10 \text{ mm/tr/dent}$ et la Profondeur de passe au niveau deux : $p = 0,5 \text{ mm}$.

Un essai de confirmation a été réalisé en utilisant la combinaison optimale de paramètres de coupe, pour vérifier expérimentalement les résultats trouvés théoriquement. Cet essai a donné une valeur de R_a égale à $0,70 \mu\text{m}$ qui est peu différente de la valeur obtenue par le modèle cité ci dessus.

b) Analyse de la variance

D'après les résultats fournis, chaque paramètre influe selon un degré d'influence sur le paramètre de rugosité R_a . Les valeurs des variances donnent une classification des paramètres par ordre croissant d'influence. Pour l'acier au carbone, la vitesse de coupe est le paramètre le plus influant car il a la variance la plus grande ($F_x(V_c) = 95,02 \%$), le deuxième paramètre est l'avance par dent ($F_x(f_z) = 4,67 \%$) et le troisième paramètre est la profondeur de passe ($F_x(p) = 0,31 \%$).

Pour l'acier duplex, l'avance est le paramètre le plus influant ($F_x(V_c) = 40,50 \%$). Après l'avance par dent, on trouve la vitesse de coupe ($F_x(f_z) = 36,23 \%$) et enfin la profondeur de passe ($F_x(p) = 23,19 \%$). La fonction $F_x(A)$ d'un paramètre A s'exprime par :

$$F_x(A) = \frac{V_x(A)}{V_r}$$

avec

$$V_x(A) = \frac{N \sum_{i=1}^{n_A} E_{A_i}^2}{n_A - 1} \quad \text{et} \quad V_r = \frac{\sum_{i=1}^N F_i^2}{ddl}$$

V_x la variance entre colonnes, V_r la variance résiduelle, N est le nombre total d'essais ($N=25$), n_A le nombre de niveaux du paramètre A ($n_A=5$), E_{Ai} l'effet du paramètre A au niveau i et ddl le nombre de degrés de liberté ($ddl=13$). r_i est le résidu pour l'essai i : $r_i = \tilde{Y}_i - Y_i$ avec Y_i la réponse mesurée et \tilde{Y}_i la réponse déterminée par le modèle théorique (1).

3.3.2 Optimisation par rapport à R_t ($\tilde{Y} = R_t$)

Le modèle linéaire pour l'acier inoxydable s'écrit:

$$\begin{aligned}
 R_t(\text{duplex}) = & 8,1 + [+0,91 \quad -1,71 \quad +3,74 \quad +1,10 \quad -4,06] V_c + \\
 & + [-2,21 \quad -1,45 \quad +1,23 \quad +0,31 \quad +2,12] f_z + [-0,22 \quad ; +1,63 \quad ; -0,74 \quad -2,14 \quad +1,48] p + \\
 & \begin{bmatrix} -0,68 & -4,04 & +4,60 & +1,45 & -1,31 \\ -4,67 & +4,32 & -1,72 & -0,14 & +2,22 \\ +1,41 & -5,91 & -0,18 & +3,18 & +1,48 \\ +6,75 & -0,41 & -3,52 & +0,34 & -3,15 \\ -2,80 & +6,05 & +0,82 & -4,83 & +0,76 \end{bmatrix} f_z p + \begin{bmatrix} -1,82 & +5,04 & -1,84 & -2,71 & +1,33 \\ -0,70 & -0,76 & +2,75 & +0,03 & -1,32 \\ +0,10 & -6,04 & -0,77 & +2,77 & +3,93 \\ -1,79 & +2,60 & 0,09 & +0,11 & -1,02 \\ +4,21 & -0,84 & -0,22 & -0,22 & -2,92 \end{bmatrix} V_c f_z + \\
 & \begin{bmatrix} -3,81 & 1,95 & +0,13 & -0,25 & 1,97 \\ +1,02 & -4,55 & -1,46 & +6,12 & -1,13 \\ +3,31 & +4,42 & -1,36 & -5,35 & -1,03 \\ +1,54 & -1,20 & +1,85 & -1,86 & -0,33 \\ -2,08 & -0,63 & +0,84 & 1,34 & 0,52 \end{bmatrix} V_c p
 \end{aligned} \quad (4)$$

La valeur minimale de R_t est égale à $6,69 \mu\text{m}$. Elle est obtenue pour l'essai où les paramètres de coupe sont :

- la vitesse de coupe au niveau cinq : $V_c = 314 \text{ m/min}$,
- l'avance par dent au niveau un : $f_z = 0,1 \text{ mm/tr/dent}$,
- la profondeur de passe au niveau quatre : $p = 1,5 \text{ mm}$.

La même combinaison de paramètres de coupe a donné la valeur minimale pour R_a . L'essai de confirmation donne une valeur de R_t égale à $7,1 \mu\text{m}$.

Le modèle pour l'acier au carbone s'écrit:

$$\begin{aligned}
 R_t(\text{acier au carbone}) = & 9,02 + [+9,25 \quad +0,52 \quad -2,65 \quad -5,33 \quad -5,828] V_c + \\
 & + [-0,84 \quad -0,45 \quad -0,21 \quad 1,89 \quad -0,37] f_z + [0,15 \quad -0,56 \quad +0,10 \quad +0,63 \quad -0,33] p + \\
 & \begin{bmatrix} 9,65 & 3,87 & -2,77 & -5,81 & -4,93 \\ -6,12 & 10,44 & 4,04 & -3,89 & -4,42 \\ -6,16 & -5,34 & 9,70 & 3,96 & -2,16 \\ -2,27 & -6,75 & -7,62 & 10,83 & 5,81 \\ 4,9 & -2,18 & -3,34 & -5,08 & 5,7 \end{bmatrix} f_z p + \begin{bmatrix} 0,55 & 0,57 & +0,54 & 2,21 & -3,89 \\ -1,20 & -0,37 & 0,08 & 0,95 & 0,54 \\ -0,01 & -0,6 & 0,15 & 0,54 & -0,08 \\ 0,12 & 0,53 & -0,70 & -2,01 & 2,06 \\ 0,54 & -0,14 & -0,08 & -1,69 & 1,37 \end{bmatrix} V_c f_z + \\
 & \begin{bmatrix} -0,44 & 0,68 & 0,22 & 3,47 & -3,93 \\ 0 & -1,48 & -0,93 & -0,77 & 3,19 \\ 2,28 & 0,01 & -0,96 & -1,69 & 0,28 \\ -1,07 & 0,44 & 1,57 & -1,35 & 0,41 \\ -0,75 & 0,26 & 0,09 & 0,35 & 0,044 \end{bmatrix} V_c p
 \end{aligned} \quad (5)$$

La valeur minimale de la rugosité est R_t égale à $6,46 \mu\text{m}$. Elle est obtenue pour l'essai où les paramètres de coupe sont:

- la vitesse de coupe au niveau cinq : $V_c=314 \text{ m/min}$,
- l'avance par dent au niveau un : $f_z=0,1 \text{ mm/tr/dent}$,
- la profondeur de passe au niveau deux : $p=0,5 \text{ mm}$.

L'essai de confirmation avec la même combinaison optimale de paramètre de coupe donne une valeur de R_t égale à $6,8 \mu\text{m}$. La différence entre la valeur mesurée et celle calculée par l'équation 5 est importante et peut être due à l'hypothèse de linéarité du modèle et aussi à l'existence des interaction de 3^{ème} ordre négligée dans cette étude.

De même que pour l'optimisation par rapport à R_t en analysant la variance, on a conclu que les trois paramètres sont influant sur R_t . Leurs degré d'influence est le même sur R_t que sur R_a .

3.4 Modélisation

A l'aide des valeurs trouvées de la rugosité pour l'acier au carbone et l'acier duplex, on a mis en place un modèle exprimant la rugosité en fonction des paramètres de coupe. Le modèle est inspiré des allures des courbes d'évolution de R_a et de R_t en fonction des différents paramètres.

Le modèle de R_a est :

$$R_a(\text{duplex}) = 4,7V_c^{-0,30}f_z^{0,25}p^{0,04} \quad (6)$$

$$R_a(\text{acier au carbone}) = 1110V_c^{-1,38}f_z^{0,23}p^{0,01} \quad (7)$$

R_a est en μm , V_c en m/min , f_z en mm/tr/dent et p en mm .

Le modèle de R_t est :

$$R_t(\text{duplex}) = 102V_c^{-0,35}f_z^{0,49}p^{0,04} \quad (8)$$

$$R_t(\text{acier au carbone}) = 11453V_c^{-1,38}f_z^{0,23}p^{0,01} \quad (9)$$

R_t est en μm , V_c en m/min , f_z en mm/tr/dent et p en mm .

4. DISCUSSION ET INTERPRETATIONS

Pour vérifier les modèles présentés précédemment (6), (7), (8) et (9), on a effectué une comparaison entre les valeurs calculées en utilisant ces équations et les valeurs déterminées par l'optimisation de Taguchi (2), (3), (4) et (5).

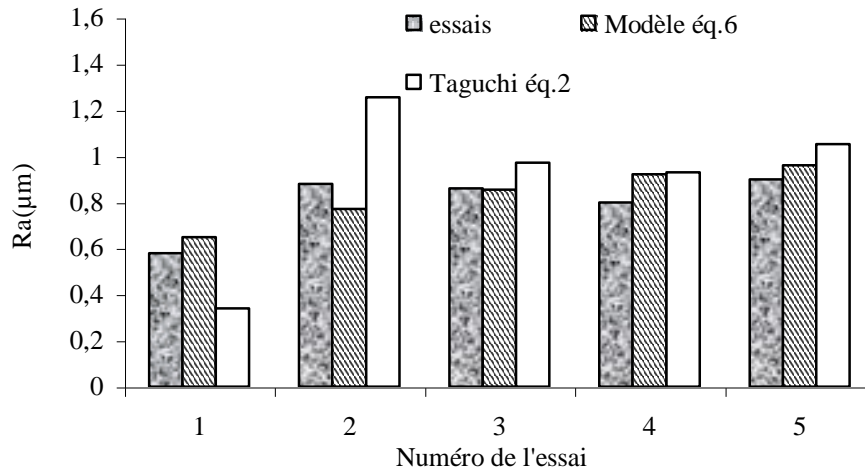


Figure 9: Comparaison des différents résultats de R_a - acier duplex.

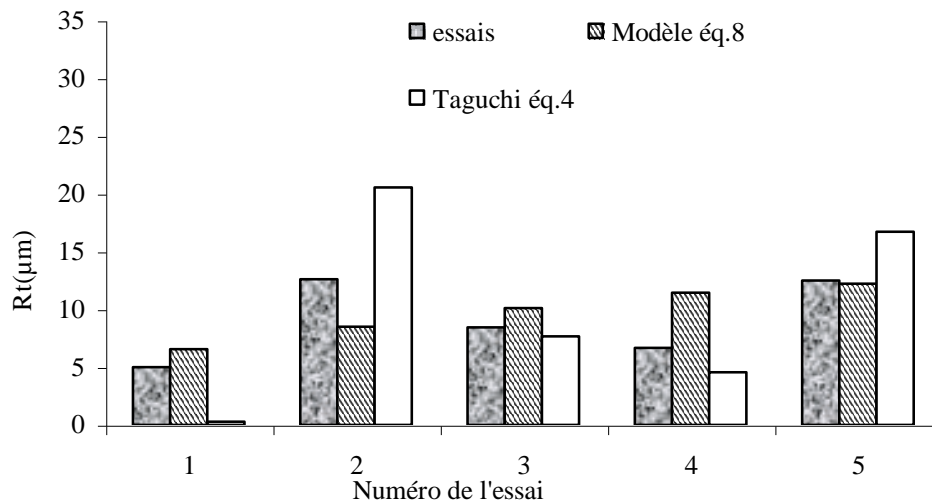


Figure 10: Comparaison des différents résultats de R_t acier duplex

Pour l'acier duplex, les figures 9 et 10 montrent la variation de R_a et R_t pour les essais de 1 à 5 (tableau 4). On note des différences entre les valeurs calculées en utilisant les modèles exponentiels (6) et (8) et les valeurs déterminées par les expressions des paramètres de rugosité R_a et R_t en fonction des effets et des interactions (2) et (4). Ces différences peuvent être dues à l'existence d'interactions de troisième ordre, pour les faibles vitesses de coupe, supposées négligeables dans cette étude.

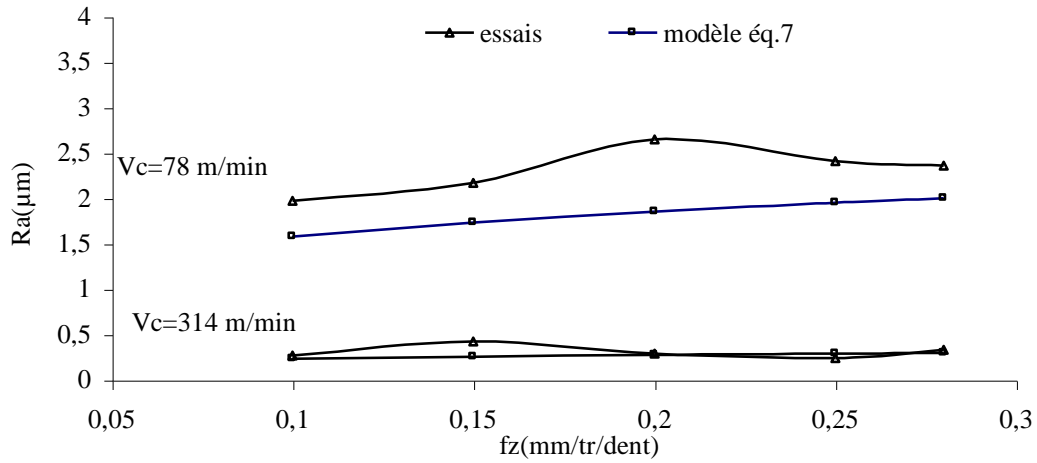


Figure 11: Variation de R_a en fonction de l'avance par dent et de la vitesse de coupe - acier au carbone

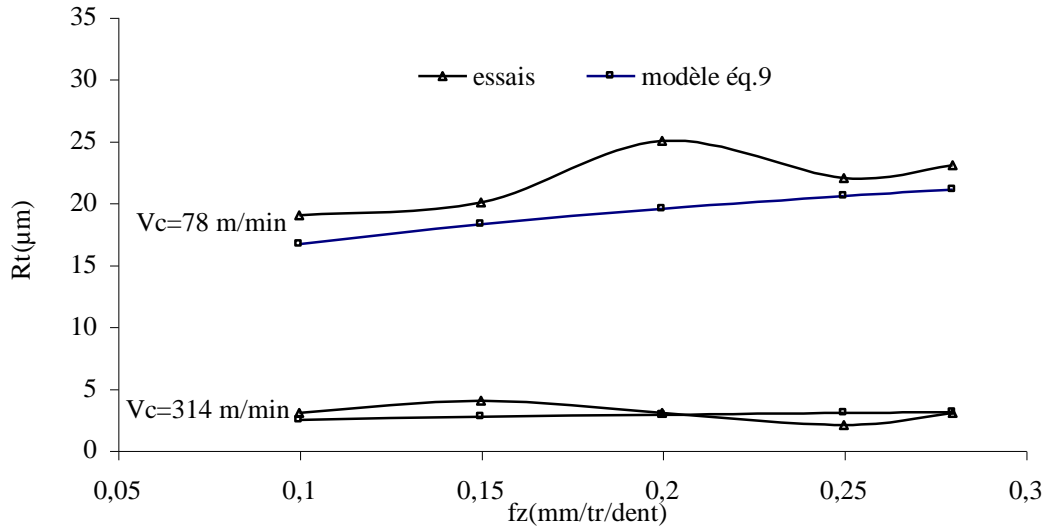


Figure 12: Variation de R_t en fonction de l'avance par dent et de la vitesse de coupe - acier au carbone

Quant à l'évolution de la rugosité en fonction des différents paramètres de coupe, les figures 11 et 12 montrent une bonne cohérence entre les résultats expérimentaux et les résultats analytiques. Les légères différences sont dues généralement aux erreurs de mesure de la rugosité.

5. CONCLUSIONS

Cette étude a été consacrée au procédé d'usinage le plus utilisé industriellement et le moins développé par les méthodes d'optimisation numérique ou analytique.

Le fraisage présente une grande présence dans les ateliers de fabrication des pièces mécaniques de grandes précisions et de hautes qualités.

Les paramètres influant sur le fraisage sont variés. Parmi cette variété, on a choisi quatre paramètres prioritaires par leurs influences : le mode de fraisage en avalant ou en opposition, la vitesse de coupe de 78 à 314 m/min, l'avance de 0,1 à 0,28 mm/tr/dent et la profondeur de passe de 0,1 à 2 mm.

Chaque paramètre a pris 5 niveaux. La méthode des plans d'expériences nous a aidé à étudier quelques combinaisons et aboutir rapidement et avec une bonne précision aux différents résultats de l'étude.

Le plan complet de 25 essais a permis d'analyser l'évolution de R_a et R_t en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. En effet pour des vitesses inférieures à 100 m/min, la rugosité augmente à cause de la formation de l'arête rapportée. Au-delà de cette dernière les efforts de coupe diminuent d'où une diminution de la rugosité. A des vitesses élevées de l'ordre de 300 m/min, la naissance de vibrations fait augmenter légèrement la rugosité. Une augmentation de l'avance fait augmenter la rugosité, due à l'augmentation des efforts de coupe.

Le plan fractionnaire $L_{25} (5^3)$ a permis d'évaluer les effets des trois paramètres sur R_a et R_t et leurs interactions deux à deux. On a trouvé que la vitesse de coupe est le paramètre qui a le plus grand effet, on trouve ensuite l'avance et enfin la profondeur de passe. De même on a confirmé l'existence des interactions entre les paramètres pris deux à deux. Ces essais ont aussi permis de retrouver, pour les deux nuances d'acier, les combinaisons de paramètres de coupe permettant de réduire à la fois R_a et R_t .

Chaque combinaison prend la valeur de la vitesse la plus élevée et la valeur d'avance de finition.

La combinaison optimale pour l'acier duplex est $V_c=314$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/tr/dent et $p = 1,5$ mm. Elle donne une valeur de $R_a = 0,54$ μ m et une valeur de $R_t = 6,69$ μ m.

Celle de l'acier au carbone est $V_c = 314$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/tr/dent et $p = 0,5$ mm. Elle donne une valeur de $R_a = 0,63$ μ m et une valeur de $R_t = 6,46$ μ m.

Les essais de confirmation donnent des valeurs proches de ces dernières avec un écart acceptable du à l'hypothèse de linéarité du modèle (1) entre deux niveaux d'un même paramètre.

Enfin un modèle empirique exprimant R_a et R_t en fonction des trois paramètres de coupe vitesse, avance et profondeur de passe pour les deux nuances d'acier.

Une bonne corrélation a été trouvée entre les valeurs calculées par la modélisation (2), (3), (4) et (5), les valeurs déterminées en utilisant les modèles empiriques (6), (7), (8) et (9) et les résultats expérimentaux.

6. REFERENCES

1. Barral M., Bouzid W., Contraintes résiduelles induites par tournage de finition dans de l'acier traité superficiellement, Colloque Portugal-France sur les contraintes résiduelles, 261, 1992.
2. Ben Salah N., Bouzid W., Influence du traitement mécanique de surface sur la résistance à la corrosion localisée en eau de mer d'un acier inoxydable duplex, Premier Colloque Franco-Libanais sur les Sciences des Matériaux, Beyrouth, Liban, 10-12 Octobre, 1996.
3. Ben Salah N., Chaouachi M. A. et Chellouf A, Role of surface finishing on pitting corrosion in sea water of a duplex stainless steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 5 (2), 220, 1996.
4. Ben Salah, N., Bouzid W., Modification of surface characteristics by mechanical treatments of a duplex stainless steel and its influence on localized corrosion in sea water, Microstructural science, **25**, Seattle Washington, 1997.
5. Bouzid W., Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale, Thèse, ENSAM, Paris, 1993.
6. Bouzid W., Ben Salah N. and Lebrun JL., Influence of machining by finishing milling on surface characteristics, Int. J. mach Tools Manufact., 41,2001.
7. Katayama S. and Imai T., Effect of tool materials on surface machined roughness and cutting force of low carbon resulfurized free machining steels, ISIJ International, 30 (4), 331, 990.
8. Ramarishna Rao P. K. and Shunmugam M.S., Investigations into surface topography, microhardness and residual stress in boring trepanning association machining, Wear, 119, 89 1987.
9. Simon S., Hector, L. G., Richmond O., Tool topographies for controlling friction and wear in metal forming processes, Journal of Tribology, 120, 517, 1998.
10. Zhang G. M. and Kapoor S. G., Dynamic of machined Surface, Part 2 : Construction of surface topography, Journal of Engineering for Industry, 113, 145, 1991.
11. Pillet M., Les plans d'expériences, Technologie n°66 – fév., 1994.