

## Etude expérimentale de l'évolution de l'usure des outils de coupe en tournage.

Saadi Abdelhafid<sup>a</sup>, Cherfia Abdelhakim<sup>b</sup>, Debbah Younes<sup>c</sup>  
<sup>a,b,c</sup>Laboratoire de mécanique

Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université Frères  
Mentouri – Constantine 1. Campus Chaab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

mahfoud54@gmail.com, cherfia\_abdelhakim@yahoo.fr, younes\_debbah@yahoo.fr

### Résumé.

A travers cette étude expérimentale, nous avons mis en évidence l'évolution de l'usure des outils de coupe en tournage en fonction des phénomènes vibratoires générés pendant l'usinage d'une pièce. Notre première démarche consistera à réaliser, des essais en tournage (chariotage) et analyser le profil de la surface de dépouille de l'outil coupant afin d'évaluer la détérioration celle-ci.

Enfin pour mener à bien notre étude et atteindre notre objectif, nous avons établi un protocole d'essais et conçu un dispositif monté sur tour EMCO maximat V13. Ce montage, considéré comme une partie intégrante de la machine, nous a permis de générer et contrôler l'amplitude des vibrations pour effectuer notre expérimentation.

Le but de notre travail est d'établir la relation entre la grandeur d'intérêt, représentée par l'usure en dépouille, et d'autres paramètres influant sur la durée de vie des outils de coupe lors du tournage.

L'exploitation de nos investigations expérimentales a bénéficié de l'apport de la méthode des plans d'expérience qui nous a permis d'organiser au mieux notre recherche.

Les résultats obtenus ont été traités sous le logiciel Matlab et ont permis de mettre en évidence l'influence du paramètre 'vibrations' sur l'estimation de la durée de vie des outils de coupe.

**Mots clés :** *Vibrations, usure, durée de vie, tournage, surface de dépouille.*

### Nomenclature des valeurs du profil de la rugosité ( $\mu\text{m}$ )

$R_p$ : Hauteur maximale des saillies.	$R_v$ : Profondeur maximale de creux.
$R_z$ : Hauteur maximale.	$R_c$ : Hauteur moyenne des éléments.
$R_t$ : Hauteur totale.	$R_a$ : Ecart moyen arithmétique
$R_q$ : Ecart moyen quadratique (RMS).	$R_{sk}$ : Facteur d'asymétrie.
$R_{ku}$ : Facteur d'aplatissement.	$R_{mr}$ : Taux de longueur portante relatif.
$R_{dc}$ : Différence de hauteur de coupe	$t$ : Temps d'usinage en (mn)
$V_c$ : Vitesse de coupe en (m/mn)	$F_b$ : Force du balourd ( N )

**1. Introduction :** Lors de l'usinage, les vibrations des machines-outils sont générées par l'interaction entre le système usinant élastique et le processus d'usinage associé au fonctionnement de la machine. Le système élastique comprend le dispositif de fixation, la pièce et l'outil. Au cours des opérations d'usinage, l'outil subit un endommagement entraînant une mauvaise qualité et une

imprécision des pièces produites. Cela explique l'intérêt d'établir un suivi de sa durée de vie qui est défini par son degré d'usure. Ainsi la maîtrise de l'usure de cet outil de coupe et son évolution au cours de l'usinage s'avère très importante [1,2]. La méthode utilisée pour concrétiser notre étude expérimentale, nous permettra d'établir la relation entre le degré de dégradation de l'outil et les vibrations du système (PMO). L'usure en dépouille a toujours été prépondérante et son évolution constitue l'objectif de notre travail. La norme NF E 66-505 définit un critère d'usure admissible pour une usure en dépouille VB de 0.3 mm si la frange de cette usure est uniforme [3]. Or cette limite peut être fixée à 0.6 mm [4]. En tournage, la surface engendrée est principalement formée par le bec de l'outil et l'arête secondaire. Toute usure du bec de l'outil a donc un effet sur la surface engendrée. Pour pouvoir conclure, suite à nos résultats expérimentaux, nous avons restreint nos efforts au tournage, qui, en lui-même, est déjà un procédé de fabrication assez complexe au niveau modélisation. Ainsi, il est nécessaire de développer des modèles permettant d'étudier les phénomènes vibratoires rencontrés au cours de l'usinage et de prévoir les conditions de stabilité des processus de coupe.

Afin de respecter l'objectif fixé, notre travail se scindera en deux parties distinctes.

## 2. Première partie

Elle consistera à réaliser, des essais en tournage (chariotage), de ce fait c'est l'arête tranchante de l'outil qui génère la surface usinée et qui subira un endommagement ou autrement dit une usure.

Nos résultats feront l'objet de deux types d'analyse.

- Analyse qualitative : Interprétation des images (3D) reflétant l'évolution de la topographie de la surface active de l'outil.
- Analyse quantitative : Etude du taux de la variation de la rugosité, prise comme critère de durée de vie, en fonction des paramètres vibratoires.

L'objectif de ces analyses est de pouvoir évaluer l'influence des vibrations produites lors d'un processus d'usinage sur la topologie des surfaces de l'outil coupant.

### 2.1. Dispositif expérimental et conditions d'usinage

Les opérations d'usinage ont été réalisées sur un tour conventionnel de modèle **EMCO-Maximat V13**, en utilisant un outil de coupe P PTG NR 1616 H16 portant une plaquette de type TNMM 160304, de nuance : TNC-S

Les ébauches utilisées sont au nombre de six, de même diamètre ( $\varnothing=40\text{mm}$ ) et de même longueur ( $l=90\text{mm}$ ), en acier ordinaire A37. Les mesures seront relevées lors du chariotage des six pièces, à sec et entre pointe.

Le déroulement des essais a eu lieu en deux étapes :

- 1<sup>ère</sup> étape : Une passe est réalisée sur chaque pièce, avec  $P=0,5\text{mm}$  (profondeur de passe) et un porte à faux de l'outil de 30 mm.

Dans un ordre croissant, la même gamme de vitesse de la broche a été sélectionnée pour exécuter six passes sur chacune des deux pièces.

La vitesse d'avance sera conservée durant tous les essais ( $V_a=0,045\text{mm/tr}$ ).

- 2<sup>ème</sup> étape: La même procédure sera effectuée sur le même lot, mais avec un porte à faux de l'outil égal à 40 mm comme le résume le tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs des vitesses de la broche

	Porte à faux (30mm)						Porte à faux (40mm)					
N°Pièce	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
N(tr/min)	155	190	260	320	440	540	155	190	260	320	440	540

## 2.2. Analyse topologique par Profil-Mètre

Après chaque opération et enregistrement des signaux vibratoires, une analyse topologique de la partie active de l'outil est réalisée à l'aide d'un profil mètre (ALTISURF 500) (Fig.3)



Figure3 : Profil mètre. (ALTISURF500)

## 2.3. Traitement qualitatif

Les images mettent en évidence la zone la plus affectée de la pastille par la détérioration suite aux opérations successives réalisées au cours des essais. (Fig5,6).

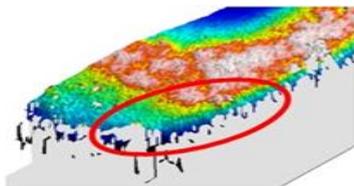


Figure 5 : image de référence

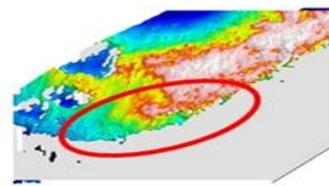


Figure 6 : Image de la dernière opération

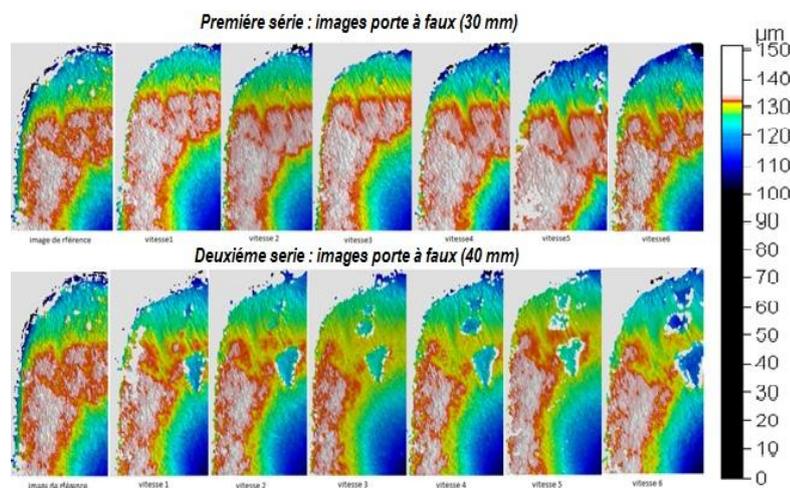


Figure 7 : Aspect de la topographie de la surface d'attaque

En prenant comme référence les images du profil de deux pastilles neuves appartenant au même lot, qui s'avère plus ou moins identique, l'analyse des images du profil obtenu après chaque opération d'usinage, pour les mêmes paramètres de coupe, en faisant varier le porte à faux, nous permet de conclure que l'usure est plus sévère. Le taux de variation de l'usure est mis en évidence par un arrachement progressif de la matière et plus précisément au niveau de l'arête tranchante. (Fig7).

#### 2.4.Traitement quantitatif

Au cours des opérations d'usinage, en considérant le porte à faux de 30mm et en faisant varier la vitesse de la broche, nous avons mesuré la valeur efficace de l'accélération de vibration(RMS) et déterminé toutes les caractéristiques géométriques du profil de l'arête tranchante de la pastille. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau2.

Tableau 2 : Résultats des hauteurs de la rugosité et de la valeur de RMS

	Porte à faux 30 mm						Porte à faux 40 mm						
	avant essai	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Rp	2.49740	2.20543	2.28443	2.55329	6.84923	6.01541	3.06794	2.36565	3.07891	2.65200	2.13463	2.41137	3.41288
Rv	1.63531	2.48635	2.81140	2.76888	5.35935	3.63298	2.80137	1.85171	3.05072	2.13134	2.47297	2.36187	4.11287
Rz	4.13271	4.69177	5.09583	5.32218	12.2086	9.64839	5.86931	4.21736	6.12963	4.78335	4.60760	4.77324	7.52574
Rc	2.05486	1.66903	1.53504	1.65397	1.79631	2.04478	1.48734	1.57923	1.56726	1.61942	1.21507	1.35639	2.21171
Rt	7.02468	7.48679	9.45917	10.0227	29.5542	20.6709	9.53092	6.67903	10.7288	6.37189	6.53849	8.04404	12.0857
Ra	0.581690	0.689649	0.689716	0.650216	0.959903	0.848118	0.655052	0.581521	0.698066	0.597503	0.600172	0.624418	0.857650
Rq	0.825181	1.02855	1.06809	1.00929	1.96774	1.76266	1.10871	0.920219	1.34473	0.934365	0.973133	0.996845	1.58054
Rsk	0.597031	(-)0.0540029	0.00716574	0.327581	0.0636423	0.531357	0.268031	0.372846	0.170787	0.640813	0.103075	0.460098	(-)0.295805
Rku	4.11052	3.30046	3.26791	3.36431	5.43905	5.39160	3.90039	3.06160	3.46168	3.92640	3.62207	3.13967	4.76331
RMS (G)-après essai-		0.40852	0.26306	0.44879	1.4511	0.73303	0.31415	0.98504	1.2209	1.1968	1.2681	2.7445	0.78251
RMS (G)-avant essai-		0,041	0,062	0,03	0,057	0,036	0,058						
vitesse (tr/min)		155	190	260	320	440	540						

Après numérisation des données relatives aux signaux vibratoires, nous obtenons le spectre référentiel de l'accélération (Fig8).

Après analyse des résultats obtenus et en prenant comme critère la hauteur maximale du profil de rugosité ( $R_z$ ), nous constatons que la variation de cette hauteur n'est pas directement proportionnelle à la valeur de l'accélération de vibration, mais son influence est ressentie à travers les valeurs qui caractérisent le profil.

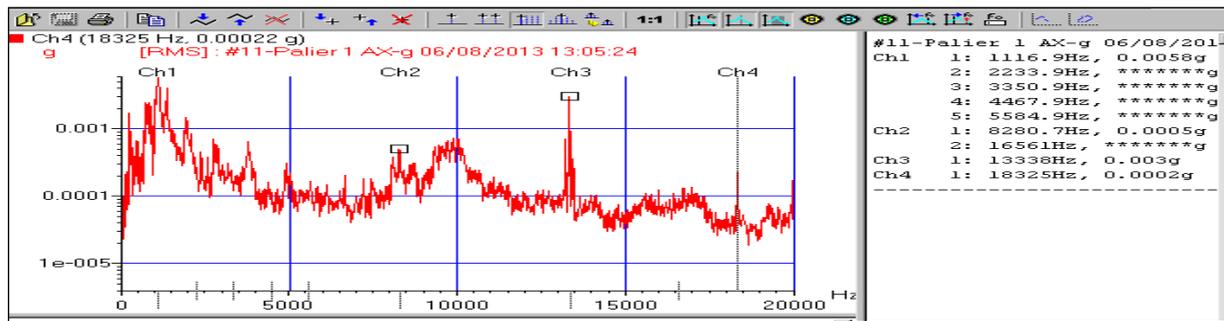


Figure 8 : Spectre référentiel de l'accélération.

### 5.1. 2.5. Discussions

A travers cette première étape nous avons mis en évidence qualitativement l'influence des vibrations sur la topologie de la surface d'attaque ainsi que l'arête tranchante de la pastille.

Pour une analyse quantitative, nous aurons besoin d'un nombre plus important d'essais.

Afin de mieux cerner notre étude, un dispositif en cours de réalisation, nous permettra de répondre plus explicitement au besoin de l'analyse quantitative de l'usure ainsi que celle de l'impact des phénomènes vibratoires générés lors de l'usinage sur la durée de vie.

### 3. Deuxième partie

Un dispositif a été conçu et réalisé dans le but de pouvoir obtenir une variation de l'amplitude des vibrations qui nous permettra de concrétiser la deuxième partie de notre objectif. Cette étape de notre travail aura pour but d'évaluer et d'analyser l'impact des phénomènes vibratoires sur la durée de vie des outils de coupe en tournage à sec.

#### 3.1. Description du dispositif d'expérimentation

Les essais ont été planifiés conformément à la méthode des plans d'expériences [5]. Pour cela nous avons conçu un dispositif (Fig. 1) que l'on considérera comme une partie intégrante du tour conventionnel de type : EMCO maximat V13. La conception du montage nous permet d'exciter le système par la fixation de différentes masses (4) sur le disque (3), qui engendrera une variation de l'amplitude des vibrations du mécanisme. L'arbre (2) est entraîné en rotation par le mandrin (1) du tour et repose sur un palier (5) fixé sur le banc (9) de la machine. L'éprouvette (7) est maintenue entre le mandrin auxiliaire (6) monté sur l'arbre (2) et la contre pointe (8) de la poupée mobile.

Le capteur (10) sert à transmettre les vibrations au système d'enregistrement des paramètres de vibrations.

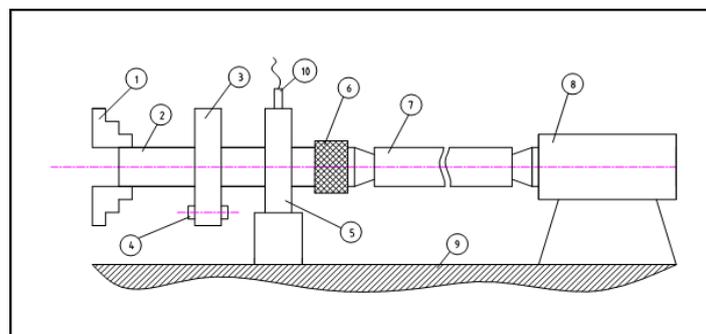


Figure 1 : Schéma du dispositif d'expérimentation

### 3.2. Conditions d'usinage

Les opérations d'usinage sont réalisées sur un tour conventionnel de modèle EMCO-maximatV13, en utilisant un outil de coupe P PTG NR 1616 H16 portant une plaquette de type TNMM 160304 et de nuance TNC-S. (Fig. 2). Une plaquette a été réservée pour chaque essai.

Les ébauches utilisées sont au nombre de huit, de même diamètre ( $\varnothing=40\text{mm}$ ) et de même longueur ( $l=200\text{mm}$ ), en acier dur de nuance C45.

La mesure des paramètres de vibration sera relevée lors du chariotage, entre pointe, de l'éprouvette relative à l'essai en cours, avec une profondeur de passe égale à 0,5 mm et une avance de 0,045mm/tr.

### 3.3. Instrumentation pour l'acquisition des mesures vibratoires

Afin de simuler les vibrations sur le mesureur de vibration (Movilog2 FFT) un capteur piézoélectrique est positionné sur le palier du dispositif d'expérimentation (Fig. 3), lors de chaque essai et pendant un temps bien défini pour l'acquisition des paramètres vibratoires. Celui-ci transforme les vibrations en signaux mesurés.

- Le dispositif capteur- Movilog, permet l'enregistrement des signaux vibratoires pendant le déroulement des opérations d'usinage.
- Le signal est numérisé dans le dispositif de mesure et transféré vers le PC par le biais d'un système d'acquisition et d'analyse (DIVA) (Fig.4).



Figure 2 : Dispositif expérimental.



Figure 3 : Capteur piézoélectrique

• Le relevé de la mesure de l'usure (VB) à été effectuée, à l'aide d'un microscope de type YF-2010 (2,5D Image Measuring Instrument), à grossissement 4,5 fois la taille réelle et une incertitude de 2% (Fig.5).



Figure 4 : Numérisation des signaux



Figure 5: microscope YF-2010

### 3.4 Organisation du protocole d'essai

La procédure expérimentale mise en place nous a permis de mesurer l'accélération vibratoire (g) pendant chaque essais d'une part et la valeur de l'usure en dépouille (VB) de l'outil à la fin de chaque opération d'autre part. Les mesures de ces deux valeurs obtenues expérimentalement seront considérées lors du traitement de nos résultats comme "réponses" autrement dit "grandeurs d'intérêts" et dépendront de trois "facteurs" sur deux niveaux.

Les masses,  $m_1$  et  $m_2$ , ont été définies de telle manière à pouvoir générer des forces de balourd provoquant des vibrations considérables qu'on mesure sur notre système expérimental.

Nous prendrons :  $m_1 = 0.004$  Kg pour le niveau -1 de  $F_{b1}$  et  $m_2 = 0.008$  Kg pour le niveau +1 de  $F_{b2}$ .

Les masses ( $m_1$ ) et ( $m_2$ ) nous permettront de calculer les forces du balourd ( $F_{b1}$ ,  $F_{b2}$ ) conformément au niveau (+1) de la vitesse de coupe ( $V_{c1}$ ).  

$$F_{bx} = m_x \cdot r \cdot \omega^2 [N]$$

$$\omega = 2\pi N/60 [rd/s]$$

Etant donné que la force du balourd dépend du nombre de tour, nous avons été contraints de déterminer les masses ( $m_3$  et  $m_4$ ) en fonction des forces du balourd ( $F_{b1}$  et  $F_{b2}$ ), afin de respecter les deux niveaux de  $F_b$  en passant au niveau haut (+1) de la vitesse de coupe ( $V_c$ ).  

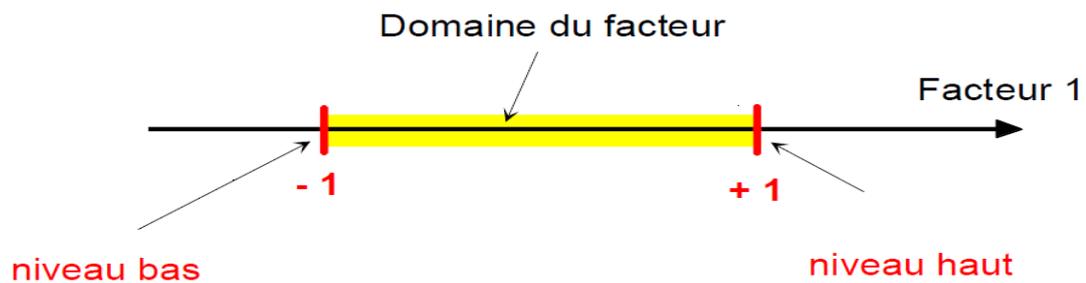
$$m_x = \frac{F_{bx}}{r \cdot \omega^2} [Kg]$$

D'où :  $m_3 = 0.001$  Kg Pour le niveau bas de  $F_{b1}$  et  $m_4 = 0.002$  Kg Pour le niveau haut de  $F_{b2}$ .

Le domaine de variation de chacun des facteurs est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

Tableau1 : Tableau des niveaux des facteurs

Niveau	$V_c$ (m/mn)	$F_b$ (N)	T (mn)
Bas	84	12,61	12
Haut	170	25,22	24



L'application de la méthode des plans d'expériences dans notre cas, se soldera par l'analyse de deux réponses, à savoir : L'usure en dépouille et l'accélération des vibrations. De ce fait la structure des tableaux rassemblant les expériences des plans et les réponses auront les configurations suivantes :

Tableau 2 : Plan d'expérience (Unités codées)

N° Essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-1	-1	-1
2	-1	+1	-1
3	-1	-1	+1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1
7	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1

Tableau 3 : Tableau d'expérimentation (Unités courantes)

N° Essai	V <sub>c</sub> (m/mn)	F <sub>b</sub> (N)	Temps (mn)
1	84	12.61	12
2	84	25.22	12
3	84	12.61	24
4	84	25.22	24
5	170	12.61	12
6	170	25.22	12
7	170	12.61	24
8	170	25.22	24

Réponses

Accél. (g)	VB (mm)
2.669	0.0415
1.907	0.0740
0.895	0.0500
1.780	0.1200
1.884	0.0660
2.132	0.0785
3.689	0.0910
2.679	0.1110

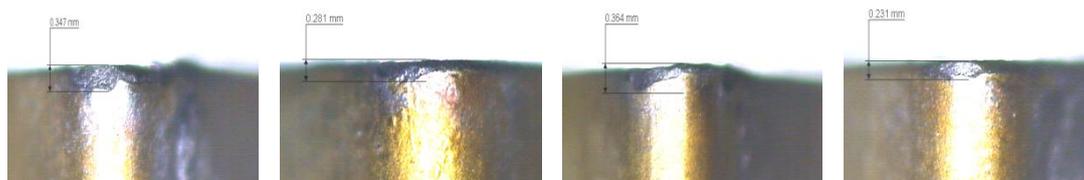


Figure 6 : Microscopie de VB

### 3. Traitement des résultats

Dans un premier lieu nous ne tiendrons compte que de la réponse " VB", pour le traitement de nos résultats expérimentaux, autrement dit l'usure de la surface en dépouille.

Le modèle du plan factoriel complet 2<sup>k</sup> est un polynôme de premier degré :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_{ij} X_{ij} + \dots + a_{ijk} X_{ijk} \quad (3.1)$$

En se restreignant à l'étude de l'usure en dépouille, celle-ci est modélisée par le polynôme (3.1).

Dans ce cas le modèle s'écrit, pour un plan 2<sup>3</sup> :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_{12} + a_{13} X_{13} + a_{23} X_{23} + a_{123} X_{123} \quad (3.2)$$

Où :

Y est la réponse (l'usure)

$a_1, a_2 \dots a_{123}$  : sont les coefficients du modèle.

$X_{12}, X_{13}, X_{23}, X_{123}$  sont les coefficients d'interactions des paramètres de coupe.

$X_1$  est la vitesse de coupe.

$X_2$  est la force de balourd.

$X_3$  est le temps.

L'équation (3.2) peut être écrite sous forme matricielle :  $[Y] = [X] \cdot [a]$  (3.3)

La résolution de cette équation (3.3) permet d'avoir les valeurs de  $\hat{a}$  :

$$\hat{a} = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot Y \quad (3.4)$$

La résolution de l'équation (3.4) a été faite sous Matlab et a donné les valeurs des coefficients suivantes :

$$\hat{a}_0 = 0,079 ; \hat{a}_1 = 0.0076 ; \hat{a}_2 = 0.0169 ; \hat{a}_3 = 0.014$$

$$\hat{a}_{12} = - 0.0088 ; \hat{a}_{13} = 0.000375 ; \hat{a}_{23} = 0.0056$$

$$\hat{a}_{123} = - 0.0037$$

On déduit les valeurs des effets à partir de l'équation (3.5) suivante :

$$Y = a_0 + a_i X_i \quad (i = 1,2,3) \quad (3.5)$$

$$a_1 = 0.0152 ; \quad a_2 = 0.0338 ; \quad a_3 = 0.028$$

Les valeurs des interactions seront obtenues à partir de l'équation (3.6) suivante :

$$a_{ij} (i \neq j) = \frac{1}{2} [ +ef^+ - ef^- ] \quad (i,j = 1,2,3) \quad (3.6)$$

$$a_{12} = - 0.0176 ; \quad a_{13} = 0.00075 ; \quad a_{23} = 0.0112 ; \quad \hat{a}_{123} = - 0.0074$$

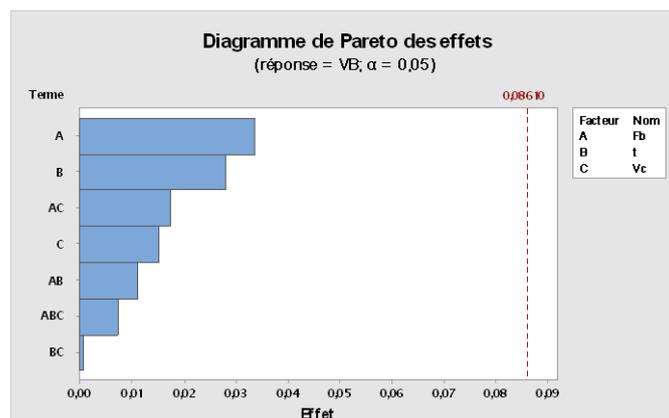


Figure 7 : Diagramme de Pareto des effets pour VB

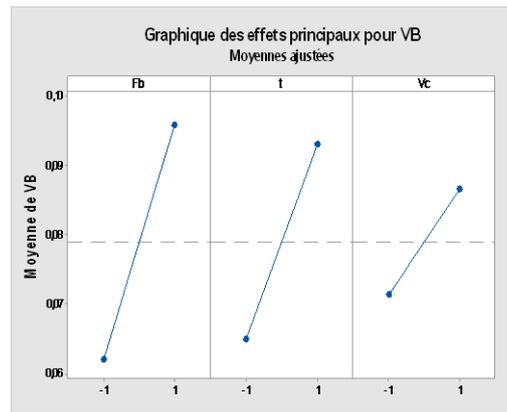


Figure 8 : Diagramme des effets principaux pour VB

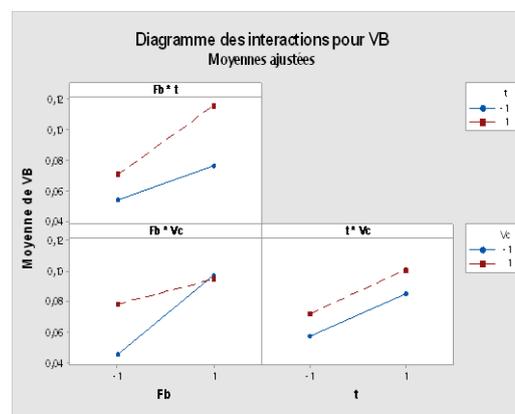


Figure 9 : Diagramme des interactions

#### 4. Conclusions

Le traitement et l'analyse des résultats nous ont conduits à faire les remarques suivantes :

- la valeur de l'usure augmente avec la vitesse de coupe, la force de balourd et le temps.
- l'usure augmente environs deux fois plus rapidement (0,0169 et 0,0140) respectivement avec la force de balourd et le temps qu'avec la vitesse de coupe (0,0076).
- La vitesse de coupe a un rôle moins prépondérant que l'effet de la force de balourd généralement génératrice de vibrations.
- Le terme  $\hat{a}_{12}$  représente la différence entre l'effet de la vitesse de coupe lorsque la force de balourd est la plus basse et l'effet de la vitesse de coupe lorsque la force de balourd est la plus élevée. Le signe négatif montre que cette différence entre les deux effets diminue.
- Le terme  $\hat{a}_{13}$  représente la différence entre l'effet de la vitesse de coupe, lorsque le temps de coupe est le plus bas et l'effet de la vitesse de coupe lorsque le temps de coupe est le plus long.
- La faible valeur de celui-ci montre que le temps de coupe agit de manière insignifiante par rapport à la vitesse de coupe.
- Le terme  $\hat{a}_{23}$  représente la différence entre l'effet de la force de balourd lorsque le temps de coupe est le plus bas et l'effet de la force de balourd lorsque le temps de coupe est le plus élevé.

On remarque que cette différence reste élevée (0,0056) et elle est de l'ordre d'un rapport de 1/3 par rapport à l'usure dû à la force de balourd prise isolément.

### 5. Références

- [1] Martin P. Influence de l'usure d'un outil de tour sur les vibrations entretenues en coupe. PhD thesis Université de Nancy I, France, 1973.
- [2] Devillez A., S. L., and W. M. Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. *WEAR*,(256),56–65, 2004
- [3] AFNOR. Essai de durée de vie des outils de tournage partie active unique. Norme Française, E66-505, 1993.
- [4] Lim, G.H. 1995 Tool-wear monitoring in machine turning. *Materials Processing Technology*.51, 25-36.
- [5] GOUPY J. Les plans d'expérience, *Revue modulad* N°34, 34-116, 2006
- [6] JET 2014 The International congress for applied <http://jet2014.sciencesconf.org>
- [7] CFM 2015 22ème Congrès Français de Mécanique