Comportement à l'usure des forets hélicoïdaux en acier rapide lors du perçage de l' acier C18

Wear behaviour of HHS twist drills when drilling C18 steel

Nacer Mokas * & Lakhdar Boulanouar

Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM), Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

Soumis le :23/04/2014 *Révisé le :01/02/2016* *Accepté le :09/02/2016*

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تبيان تشغيلية الفولاذِ C18 أثناء عملية التثقيب . ولبلوغ هذا الهدف مجموعتان من التجارب طويلة المدى قد أجريت باستعمال أدوات ثقب حلزونية من الفولاذ السريع , مختلفة من حيث الطول والقطر. أما طول الثقب فيقارب 80 مم مع استعمال التبريد المتواصل و إخراج المثقب بطريقة مدروسة. المنهجية المتبناة لإجراء هذه التجارب هي طريقة تخطيط التجارب , و من أهم العناصر المدروسة هي تآكل أداة التثقيب (عمر المثقب) و حالة السطح المشغل , حيث عنصر التآكل المقرر هو 0.5 مم حسب سطح الخلوص . تظهر النتائج المتحصل عليها أن تشغيلية الفولاذ C18 جيدة من حيث عمر أداة التثقيب بالنسبة لجميع ظروف التشغـيل و التي تتراوح بين 19 و 495 دقيـقة .أما حالة السـطوح (Ra) فهي تتراوح بين 2.18 و 6.24 µم.

الكلمات المفتاحية : *تشغيلية - الفولاذ- التثقيب - المثقب - الفولاذ فائق سرعة القطع - تثلم - عمر الأداة* .

Résumé

Dans ce travail sont exposés les résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement à l'usure des forets hélicoïdaux en acier rapide lors du perçage de l'acier C18. Les essais de perçage ont été effectués avec des forets de différentes longueurs et de différents diamètres. La longueur du perçage est d'environ 80 mm en présence d'une lubrification abondante et d'un cycle de débourrage adopté. La méthodologie entreprise pour la réalisation des essais est celle de planification des expériences. Le paramètre de sortie étudié est l'usure (durée de vie du foret). Les paramètres d'entrée investigués sont la vitesse de coupe, l'avance et le diamètre du foret. Le critère retenu de l'usure admissible est VB=0,5 mm suivant la surface en dépouille principale. Les résultats montrent que l'acier C18 se caractérise par une bonne usinabilité (la durée de vie T varie de 19 à 495 min) et ceci pour toutes les combinaisons du plan d'expérience étudié.

Mots clés : *usinabilité, perçage, foret, acier rapide, usure, durée de vie.*

Abstract

The objective of this study is the determination of the machinability of the steel C18 during drilling. To reach to this objective, two trials series of longue duration have been realized with the helicoid drill of high speed steel, of different length and diameters .The drilling length is about 80mm with abundant lubrication and a cycle of adopts stripping.The enterprise methodology for the realization of trials is so the experienced planning. The principle studied factors are the wear (life of drill) and the roughness of the machined surface. The criterion of the wear restraint eligibility is of 0.5mm along the surface in skin.The results shows that the steel C18 is characterized by the best machinability, made that the life of the tool for the different machining condition vary between 19 and 495 min. The values of the roughness Ra vary between 2,18 and 6,24 µm.

Key words : *machining, drilling, drill, high speed steel, roughness-wear, tool life.*

* *auteur correspondant : nacermokas@hotmail.fr*

©UBMA - 2016

1. INTRODUCTION

Le procédé de perçage est largement utilisé dans la productique mécanique. En effet, dans la mécanique générale environ 25 % des usinages sont des opérations de perçage [1]. Le progrès de l'industrie mécanique connaît une grande concurrence entre les producteurs dans ce domaine, car la valeur d'une pièce produite en mécanique est définie par la quantité et la qualité du produit durant un temps bien précis. Ces facteurs ne se maîtrisent que par l'application d'une méthodologie adéquate permettant d'optimiser les conditions de travail.
L'usinage par enlèvement de matière se classe parmi les procédés les plus utilisés comparativement à ceux par déformations ou autres [2, 3]. L'étude et l'analyse des phénomènes qui accompagnent l'usinage demeurent un domaine inévitable pour comprendre et expliquer les mécanismes physiques de la coupe. En dévoilant les secrets de ces mécanismes on pourra exploiter de façon rationnelle le système d'usinage, en adoptant les conditions les plus adéquates [4,5]. Ces conditions sont en relation directe avec les paramètres technico-économiques tels que la précision macro et micro- géométrique, le coût de fabrication et la productivité du travail. Toutes ces notions s'englobent sous la notion de l'usinabilité des aciers [3, 4, 5, 6,]. Cette dernière est une propriété complexe qui caractérise l'aptitude à la mise en forme par enlèvement de matière d'un matériau [3, 4]. La coupe est un processus thermomécanique où les déformations plastiques, la chaleur et les phénomènes de frottement jouent un rôle déterminant sur l'usure des outils [7].
Les critères d'évaluation de l'usinabilité sont la vitesse de coupe, les efforts de coupe, la rugosité de la surface usinée et la température de coupe. Il est à noter que la vitesse de coupe est considérée comme le principal critère, alors que les autres jouent un rôle complémentaire [8]. Étant donné, le caractère complexe du procédé de perçage, très peu de travaux ont été publiés dans ce domaine. Dans ce cas, l'outil à double tranchant (foret) travaille dans des conditions relativement plus sévères et notamment lors du perçage des trous profonds. En effet, on assiste à un dégagement de chaleur très intense au niveau de la partie active, suite à la mauvaise évacuation des copeaux et la difficulté de faire parvenir le liquide de lubrification à la zone de coupe. Ceci affecte la dureté du foret et par conséquent son usure s'intensifie et peut aller jusqu'à l'effondrement.
C'est dans ce contexte que nous voulons exposer dans cet article les résultats d'une étude expérimentale pour la détermination de l'usinabilité de l'acier C18 lors des opérations de perçage. Comme paramètre d'étude nous avons opté pour l'investigation de l'usure en fonction du temps (Fig.7, 8 et 9) pour les différentes combinaisons du plan d'expériences (Tab. 1).

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais de perçage sont réalisés d'après la méthode classique de longue durée. Ils sont effectués dans des conditions proches de celles industrielles. La machine-outil utilisée est une perceuse à colonne modèle 2H125T, ayant un moteur électrique d'une puissance de 2,2 kW et une fréquence de rotation maximale de 1430 tr/min (Fig. 1).

Figure 1**:** Perceuse à colonne modèle 2H125T.

©UBMA - 2016

Les éprouvettes d'essais sont en acier C18 (Fig. 2), ayant la composition chimique et les caractéristiques mécaniques suivantes : (0,18%C ; 0,492% Mn ; 0,307% Si ; 0,09% P ; 0,033% S ; 0,032% Cr ; 0,021% Mo ; 0,078% Ni ; 0,195% Cu ; traces de V) et (67,8 HRB ; Rm = 59 daN/mm^{2}et 10% A). La composition chimique a été identifiée par un thermo scientifique ARL 4460 à émission spectrométrique optique (OES : Optical Emission Spectrometer).

Figure 2: Éprouvette d'essais et illustration d'une opération de perçage.

Deux types de forets ont été utilisés :

- ***Foret hélicoïdal à queue conique de 20mm de diamètre* :** Il a une longueur totale de 315mm, une longueur taillée de 210mm et une partie active de 10mm. L'angle au sommet 2χr a une valeur de 120°.
- ***Foret hélicoïdal à queue cylindrique de 10mm de diamètre* :** Il a une longueur totale de 175mm, une longueur taillée de 115mm et un angle au sommet 2χr de 118° (Fig. 3).

Figure 3 : Types de forets utilisés.

Le suivi de l'évolution de l'usure a été réalisé sur un microscope d'atelier ayant une précision de 5 microns, doté d'un dispositif de positionnement fabriqué par nos soins au sein de l'atelier d'usinage du département de Génie Mécanique de l'université Badji Mokhtar-Annaba (Fig. 4). Ce dernier permet l'orientation du forêt, afin que toutes les surfaces et les arêtes tranchantes de la partie active du forêt puissent être mesurées sur le microscope.

Figure 4: Microscope et dispositif de positionnement des forets.

©UBMA - 2016

Les conditions de travail retenues sont la vitesse de coupe (Vc=11,15 à 22,30 m/min), l'avance (S = 0,1 à 0,2 mm/tr) et la profondeur de passe égale au diamètre du foret (D=10 à 20 mm). Etant donnée que la bande d'usure sur la surface en dépouille principale est irrégulière, et en se référant à la norme ISO 3685:1993 relative aux essais de durée de vie des outils, l'usure admissible retenue pour déterminer la durée de vie est VBmax= 0,5mm (Fig. 5).

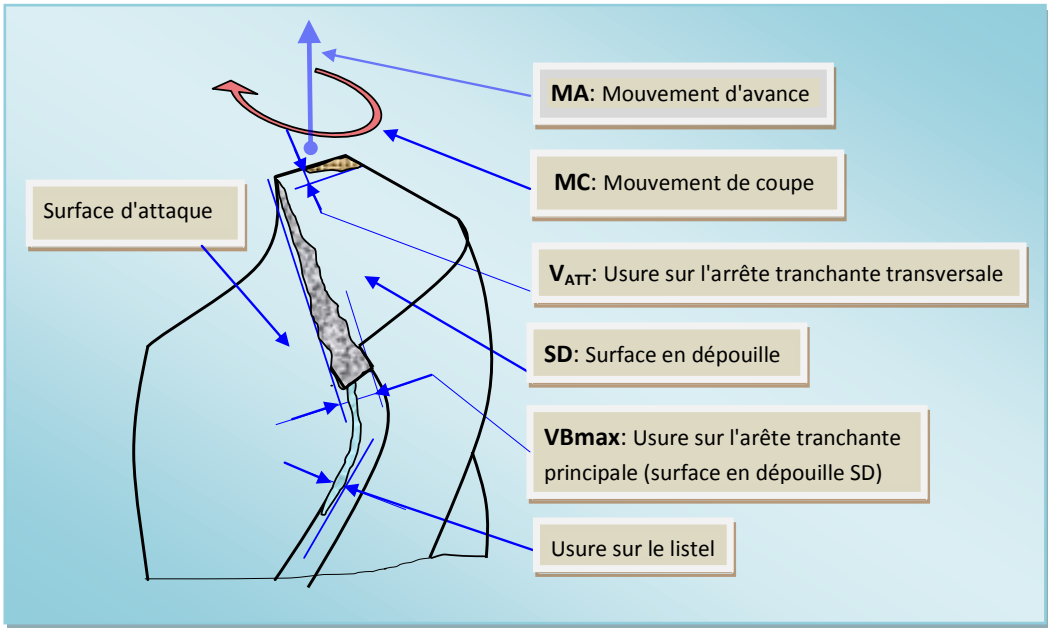

Figure 5 : Morphologie de l'usure sur la partie active et de guidage d'un forêt hélicoïdal.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

Les résultats du suivi de l'évolution de l'usure en fonction du temps sur les surfaces en dépouille (VB_{max}), sur les arêtes tranchantes transversales (V_{ATT}), sur les surfaces d'attaque (L) et sur les listels (L_{ST}) des forêts testés pour les différentes conditions de travail sont illustrés respectivement sur les figures 6, 7, 8 et 9.

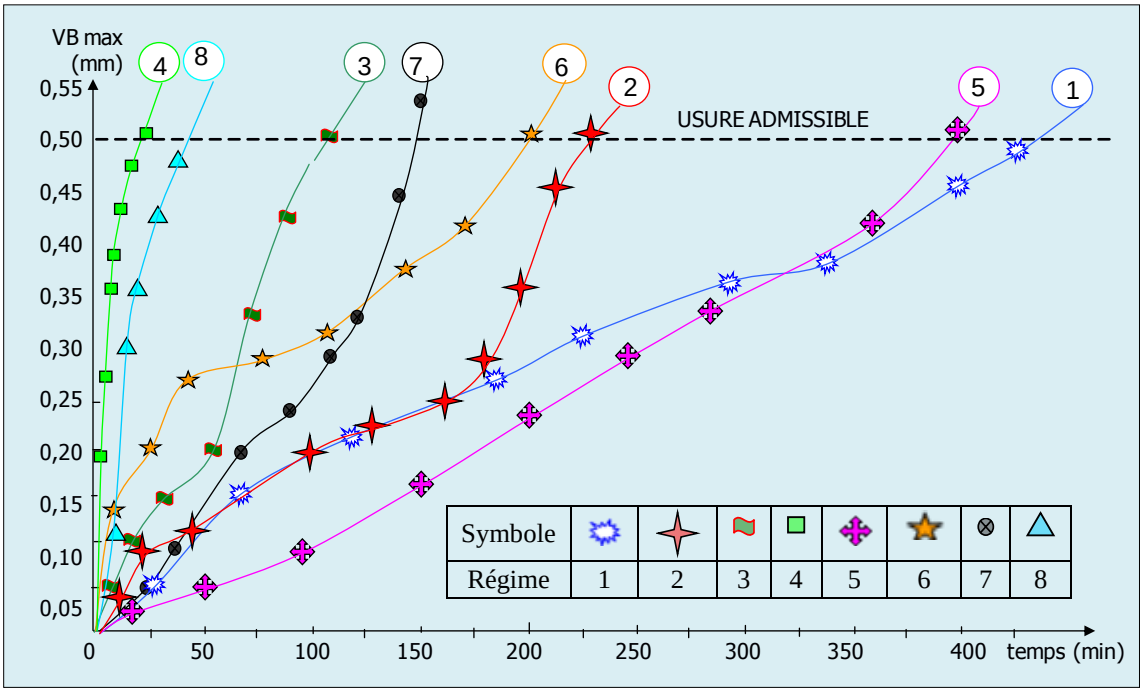

Figure 6 : Evolution de l'usure sur la surface en dépouille principale VBmax en fonction du temps pour les huit combinaisons du plan d'expériences (Tab. 1).

©UBMA - 2016

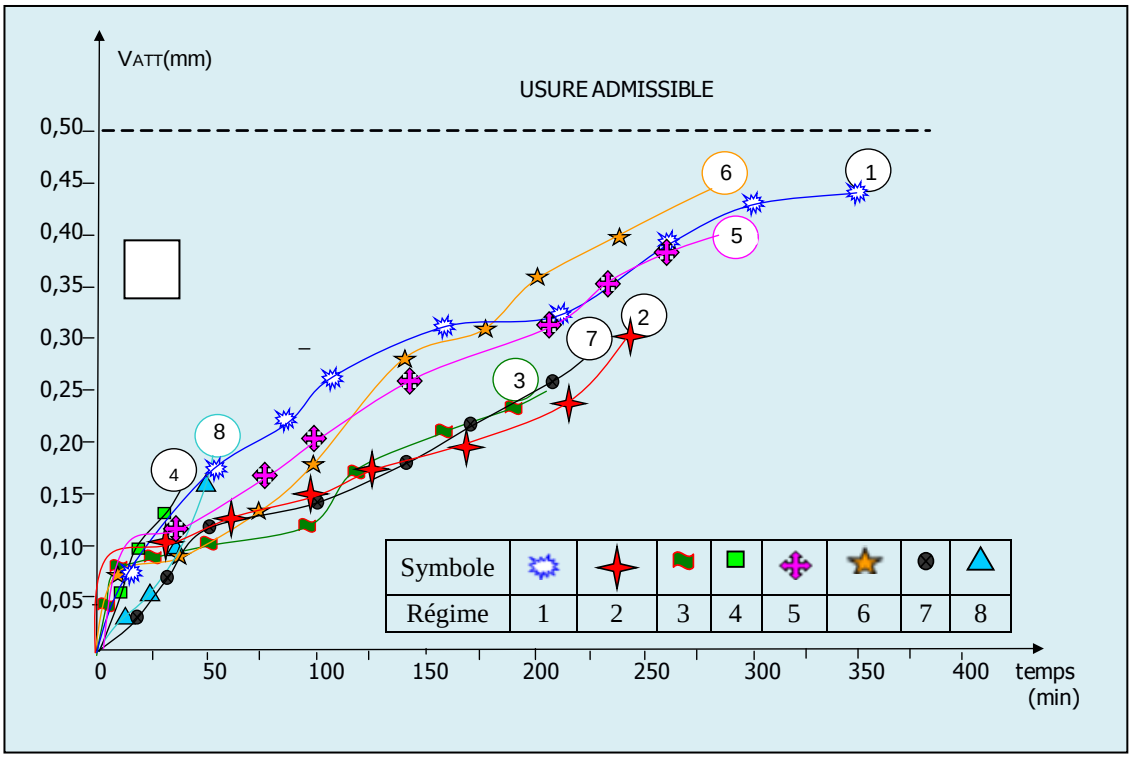

Figure 7 : Evolution de l'usure sur l'arrête tranchante transversale VATT en fonction du temps pour les huit combinaisons du plan d'expériences (Tab. 1).

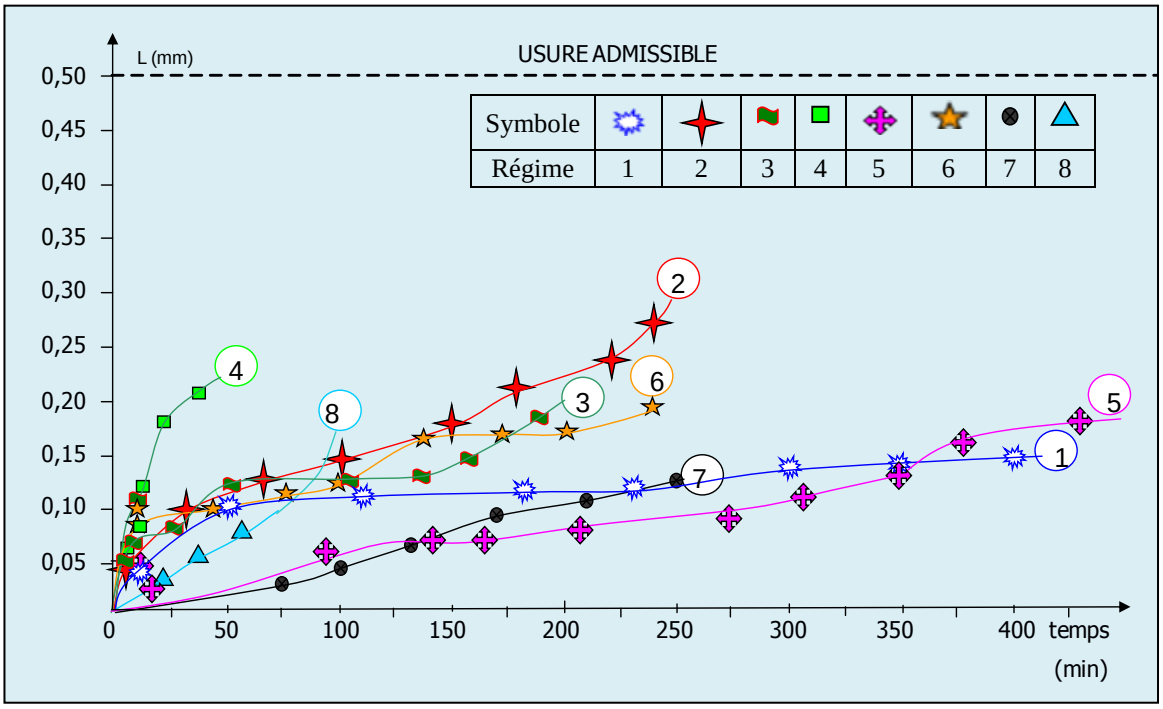

Figure 8 : Evolution de l'usure sur la surface d'attaque (SA) en fonction du temps pour les huit combinaisons du plan d'expériences (Tab. 1).

©UBMA - 2016

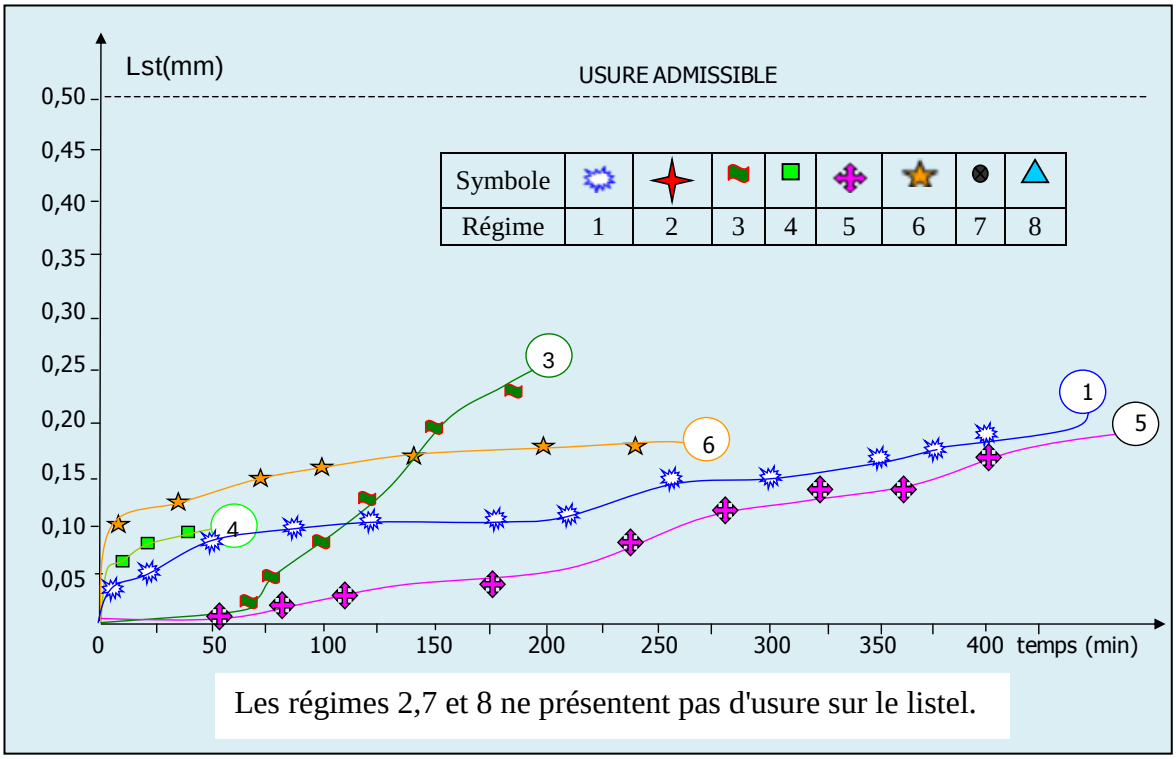

Figure 9: Evolution de l'usure sur le listel en fonction du temps pour les huit combinaisons du plan d'expériences (Tab. 1).

En se basant sur le critère de l'usure admissible retenu, le traitement graphique des résultats de l'évolution de l'usure en dépouille principale (VBmax), en fonction du temps (Fig. 6), permet de déterminer les durées de vie des forêts, pour toutes les combinaisons du plan d'expériences établi (Tab. 1).

Tableau 1**:** Valeurs expérimentales et prédites de la durée de vie des forêts pour les différentes combinaisons du plan d'expériences.

N°	Paramètres d'entrée			Durées de vie (T, min)	
	Vc	S	D	Expérimentales	Prédites
1	11,15	0,1	10	478,42	549,60
2	22,30	0,1	10	245,44	196,00
3	11,15	0,2	10	180,90	136,63
4	22,30	0,2	10	33,75	49,27
5	11,15	0,1	20	484,32	596,53
6	22,30	0,1	20	239,76	212,61
7	11,15	0,2	20	158,45	148,29
8	22,30	0,2	20	54,12	52,94

Le traitement selon la méthode des moindre carrés [4, 7, 8] des valeurs des durées de vie expérimentales (Tab. 1) en fonction des différentes combinaisons du plan d'expériences, permet la détermination d'un modèle mathématique, ayant la forme suivante :

$$Y = C \,.\, X_1^{k1} \,.\, X_2^{k2} \ldots Xn^{kn} \qquad (1)$$

©UBMA - 2016

L' expression 1 exprime la relation qualitative et quantitative entre le paramètre de sortie (Y) et les paramètres d'entrée (X_1, X_2, ...X_n) du processus de perçage étudié. En se référant à ce qui vient d'être cité et pour les conditions concrètes et les résultats obtenus dans cet article, nous suggerons le modèle mathématique suivant de la durée de vie :

$$T=\frac{e^{5.002}\times D^{0.118}}{Vc^{1.486}\times S^{2.005}} \qquad (2)$$

Ce dernier se caractérise par un coefficient de détermination $R^2 = 0,86$.

A partir de l'expression (2), on peut déterminer aisément l'expression (3) de la vitesse de coupe technologique (V_T), qui pour des durées de vie données peut prédire la vitesse de coupe correspondante :

$$V_T=\frac{e^{3.366}\times D^{0.079}}{T^{0.678}\times S^{1.849}} \qquad (3)$$

L'analyse du modèle (2) montre que le diamètre influe proportionnellement sur la durée de vie, alors que l'influence de la vitesse de coupe et de l'avance est inversement proportionnelle. Il est à noter que l'avance a un degré d'influence plus prononcé sur la durée de vie suivie par la vitesse de coupe et enfin par le diamètre du foret . Ce constat est justifié par les valeurs des exposants des facteurs (Vc, S et D).

Une analyse statistique (ANOVA) plus approfondie a permis la détection du modèle suivant de la durée de vie (T) en fonction des effets principaux et de leurs interactions:

$$T=234,40 - 91,10\ Vc - 127,60\ S - 0,20\ D + 28,30\ Vc.S + 3,90\ Vc.D - 0,30\ S.D \qquad (4)$$

L'estimation du pourcentage de contribution des différents facteurs ainsi que celui de leurs interactions sur la durée de vie T est illustrée dans le tableau 2.

Tableau 2 **:** Analyse de variance (ANOVA) pour la tenue T.

source	DL	SomCar séq	Ajust	CM ajust	F	P	C%
V_C(m/min)	1	66434	66434	66434	179,59	0,047	33
S (mm/tr)	1	130234	130234	130234	352,06	0,034	64
D (mm)	1	0	0	0	0,00	0,978	0
V_C*S	1	6388	6388	6388	17,27	0,150	3
S*D	1	1	1	1	0,00	0,973	0
V_C*D	1	122	122	122	0,33	0,668	0
Erreur	1	370	370	370			0
Total	7	203548					100
R carré = 99,82 %							

Cette analyse a été faite avec un risque d'erreur $\alpha = 0,05$, autrement dit avec un niveau de confiance à 95%. Ainsi, selon la colonne de (P) du tableau 2 on seuls la vitesse de coupe Vc et l'avance S sont les éléments ayant une influence significative. La lettre C illustre le pourcentage de participation ou de contribution de chaque élément sur la durée de vie. La figure 10 montre clairement que l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance provoque la régression de la tenue des forets, tandis que le diamètre ne joue pas un rôle significatif. Quand au rôle des interactions, on remarque sur la figure 11 que seule la combinaison "Vitesse de coupe - Avance" a une a une influence qui reste relativement insignifiante (pourcentage de contribution: 3%).

©UBMA - 2016

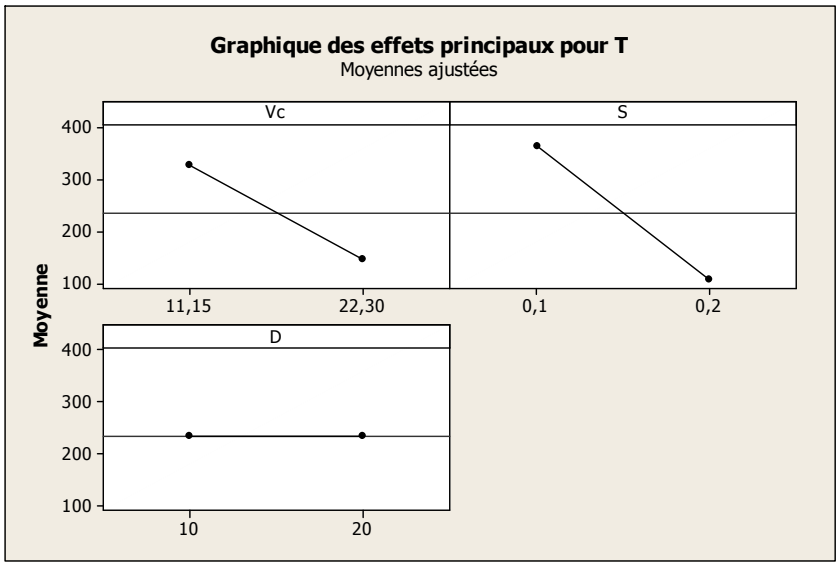

Figure 10 : Diagramme de l'effet des facteurs principaux sur la durée de vie (T)

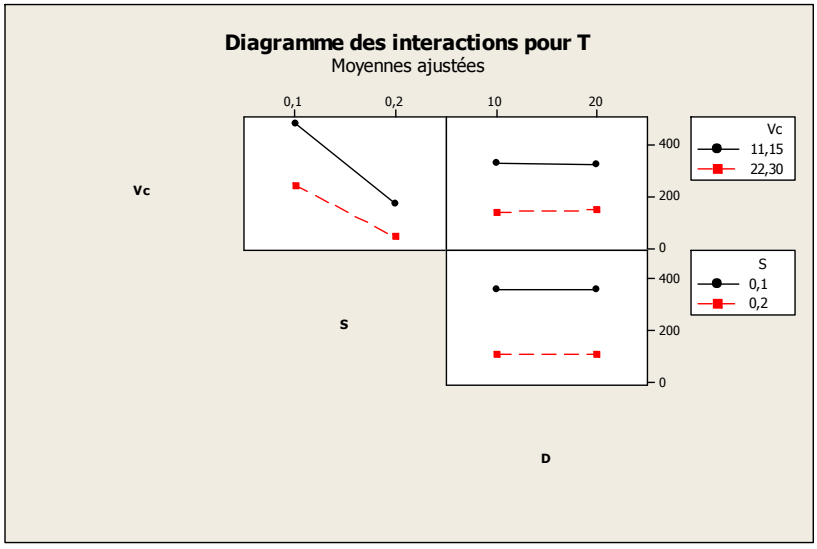

Figure 11**:** Diagramme de l'effet des interactions des facteurs sur la durée de vie (T) .

3.2 Discussion

L'analyse des résultats expérimentaux représentés sur les figures 6, 7, 8, et 9 montre que l'usure évolue en fonction du temps en suivant l'allure de la loi universelle de l'usure [1, 4, 5, 6, 7].

La représentation graphique des résultats expérimentaux met en évidence l'effet des différentes combinaisons du plan d'expériences (PE) sur la durée de vie des outils testés. La comparaison des tenues selon les graphes pour les régimes ayant un seul facteur qui change permet de distinguer l'influence de ce dernier sur la tenue du forêt. En effet, d'après les figures 6, 7, 8 et 9, pour les régimes ayant comme variable la vitesse de coupe (Vc), on constate que pour les régimes (1; 2) – (3; 4) réalisés avec le forêt Ø10mm et (5; 6) – (7; 8) avec Ø 20mm, les usures sur la surface de dépouille (VB_{max}), sur la surface d'attaque (L) et sur l'arête tranchante transversale (V_{ATT}) s'accroissent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ce qui confirme les principes généraux de l'usure des outils [1, 5].

©UBMA - 2016

L'analyse montre également que pour les couples des régimes (1, 3) – (2, 4) et (5, 7) – (6, 8), effectués respectivement avec les forêts Ø 10mm et Ø 20mm, où l'avance est considérée comme variable, les usures sur la surface de dépouille (VB_{max}), sur la surface d'attaque (L) et sur l'arête tranchante transversale (V_{ATT}) s'accroissent avec l'augmentation de l'avance.

Par analogie selon les régimes (1,5) – (2,6) et (3,7) – (4,8), il ressort des figures 7, 8, 9 et 10 qu'avec l'augmentation du diamètre du forêt, la durée de vie s'accroît. Ceci va dans le sens opposé de ce qui est rencontré dans d'autres procédés, où avec l'augmentation de la profondeur de passe la tenue de l'outil a tendance à diminuer [4, 5]. Cela s'explique d'une part par le fait qu'avec l'accroissement du diamètre, les conditions de dissipation de la chaleur de la zone de coupe, la disponibilité d'espace pour assurer une bonne lubrification et l'évacuation des copeaux se trouvent nettement améliorées. Par conséquent, cet environnement de travail contribue inévitablement à la réduction de la température de coupe de l'outil, ce qui conduit à l'accroissement de la résistance à l'usure. Toutefois, il est opportun de signaler que l'influence du diamètre sur la durée de vie est relativement plus faible que celle de l'avance et de la vitesse.

Ce qui est acquis des résultats expérimentaux obtenus (VBmax), concernant le procédé de perçage, c'est que l'influence de l'avance sur l'usure (Tenue) est dominante. En effet, plus cette dernière augmente, plus on assiste à une usure plus importante. Il est à remarquer également que l'effet de la vitesse sur la tenue des forêts est plus faible que celui de l'avance. Etant donné que le listel se caractérise par un bon état de surface, son usure est insignifiante.

Lors du relevé de l'usure en fonction du temps, on constate parfois que l'usure n'est pas toujours croissante. Ceci est dû au phénomène de formation et de disparition de l'arête rapportée qui protège les arêtes tranchantes contre l'usure au cours de l'usinage. Par contre, ce phénomène à des conséquences négatives sur l'état de surface des trous réalisés. En outre, au cours de la disparition de l'arête rapportée et suite à sa forte adhésion avec la surface d'attaque, ce phénomène peut engendrer des arrachements de matière, dégradant ainsi la partie active de l'outil.

La figure 12, illustre la morphologie de l'usure suivant les surfaces de dépouille principale, de l'arête tranchante transversale et de la surface d'attaque. L'analyse des figures 13 et 15 montre la morphologie de l'usure sur la surface en dépouille. Cette dernière est beaucoup plus accentuée à la périphérie du forêt, car en cet endroit la vitesse de coupe atteint sa valeur maximale, causant ainsi une élévation de la température et des efforts de coupe considérables. Par contre, elle est plus stable au milieu de l'arête tranchante, tout en s'amincissant en s'approchant de l'âme du forêt.

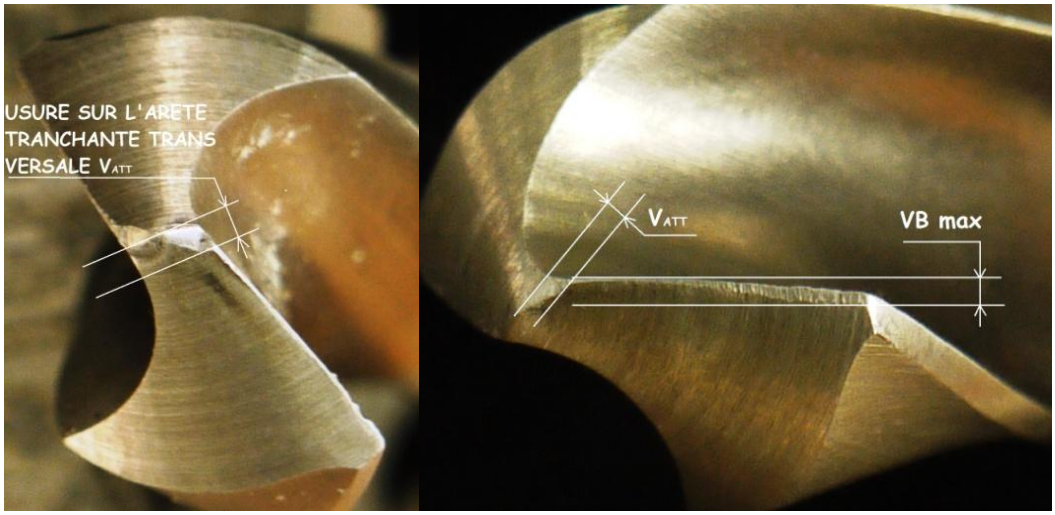

Figure 12 : Usure sur la surface en dépouille (VB max) et sur l'arête tranchante transversale (VATT).

Parfois, lors de la réalisation des essais on remarque l'apparition de cassures très importantes, conduisant jusqu'à la mise hors service du forêt. Ceci est dû aux chocs et au blocage de celui-ci contre la matière à usiner lors des opérations de débourrage (Fig. 13).

©UBMA - 2016

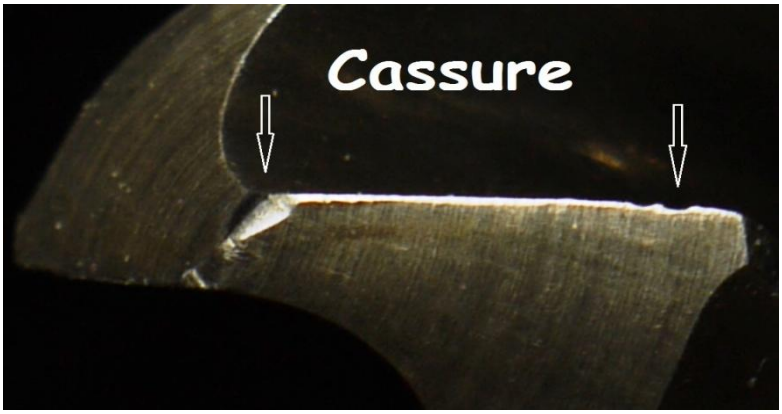

Figure 13 : Cassure sur la surface de dépouille et sur l'arête tranchante transversale.

L'analyse des figures 14, 15 et 16 montre le dépôt de particules de matière collée (arête rapportée) à la surface de dépouille (SD), à la surface d'attaque (SA) et sur le listel. L'apparition de cratère généré suite aux frottements du copeau sur la SA est constatée. La figure 17, montre l'effet du bon état de surface du listel sur le faible taux d'usure.

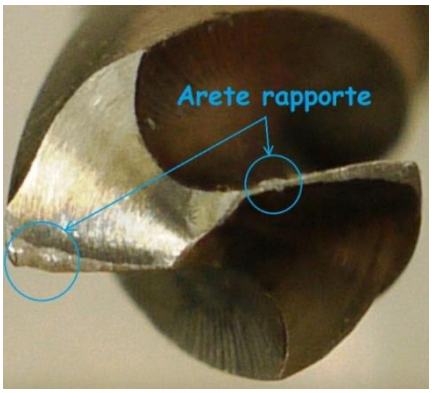

Figure 14 : Morphologie de l'usure sur la surface en dépouille

Figure 15 : Morphologie de l'usure sur la surface d'attaque

Figure 16 : Morphologie du Listel

4. CONCLUSION

Quoi que l'étude du phénomène de l'usure des outils de coupe soit pavée d'une grande complexité par l'intervention de plusieurs phénomènes qui en régissent, il demeure d'un énorme intérêt pour la technologie de la coupe des métaux.

L'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux, relatifs à l'étude du comportement à l'usure de l'acier C18 lors des opérations de perçage à l'aide des forets hélicoïdaux en acier rapide est jugée d'un immense intérêt tant sur le plan économique que sur le plan technologique, car les modèles obtenus peuvent être utilisés pour les calculs du prix de revient de l'opération de perçage de l'acier considéré. Ces résultats demeurent exploitables pour évaluer les caractéristiques d'usinabilité de l'acier testé, et permettent aussi de gérer d'une manière juste les facteurs du régime de coupe afin d'atteindre la productivité optimale. Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

©UBMA - 2016

- l'allure de l'usure des forêts est analogue à celle des outils des autres procédés d'usinage. Le foret s'use en service suivant la surface en dépouille, la surface d'attaque; l'arête tranchante transversale et le listel.
- l'usure déterminante est celle qui se produit sur la surface en dépouille. La bande de l'usure a une forme irrégulière. En effet, elle est plus accentuée au voisinage du listel. Cela s'explique par le fait que la vitesse de coupe sur la périphérie est plus grande qu'au centre du forêt.
- l'analyse des résultats représentés graphiquement montre qu'avec l'augmentation de la vitesse et de l'avance l'usure augmente, alors qu'elle diminue avec l'augmentation du diamètre. Les modèles tirés sont en très bonne corrélation avec les résultats expérimentaux et peuvent êtres exploités industriellement.
- l'influence des éléments du régime de coupe sur l'usure du listel et sur la surface d'attaque s'est montrée insignifiante.
- l'influence des éléments du régime de coupe sur l'usure de l'arête tranchante transversale est relativement faible par rapport à celle de l'usure en dépouille.

- les tenues des forets pour les différents régimes sont importantes, ce qui permet de conclure que l'acier usiné a une bonne usinabilité.
- l'analyse statistique ANOVA a permis l'identification et la quantification des paramètres du régime de coupe, ayant une influence significative sur la durée de vie, telles que l'avance et la vitesse de coupe (pourcentages de contribution respectifs: 64% et 33%), alors que l'effet du diamètre du foret s'est montré non significatif. Par contre, l'analyse de l'effet des interactions sur la durée de vie de l'outil, montre que, seule la combinaison "Vitesse de coupe- Avance" a une influence qui reste relativement insignifiante (pourcentage de contribution: 3%).

Etant donné que l'usinabilité est une propriété complexe des matériaux et qu'elle est peu étudiée en perçage il reste encore difficile de répondre à toutes les interrogations relatives à cette caractéristique intrinsèque du matériau. Cette étude reste une investigation intéressante qui pourra initier d'autres éventuelles contributions afin d'éclairer davantage les interrogations qui entourent cette question.

REFERENCES

[1] Boulanouar L., Zeghib N., Djamaa M.C, 1991, Traitement statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers. Rapport N°1, Projet de recherche J2301/01/90, Annaba, Nov. 1991.

[2] Tonshoff H.K., Kastner W., R. Schnadt R., 1989, Usinabilité des aciers forgés en coupe interrompue, *Journal of Matériel Processing Technology*, Institute for production engineering and machine tools, University of Hannover Schlosswender Str 5, Germany, Décembre 1989, pp. 219-236.

[3] Boulanouar L., 1986, Modélisation statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers difficilement usinables. Thèse de Doctorat, Sofia, (Bulgarie), 1986, 200p .

[4] Wang Y., Yan X., Li B., Tu G., 2012, The study of the chip formation and wear behaviour for drilling forged steel S48CS1V withTiAlN-coated gundrill, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 30, pp. 200-207.

[5] Poulachon G., 2004, Usinabilité des matériaux difficiles-Application aux aciers durcis, *Techniques de l'Ingénieur,* Avril 2004-BM7048.

[6] Sabre R., Planification expérimentale en agroalimentaire, 2006, *Techniques de l'ingénieur*, 10 Mars 2006, Réf. 1005, (1-16).

[7] Montoya M., 2013, "Optimisation du perçage d'empilages CFRP/Titane et/ou Aluminium" Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France.

[8] Boulanouar L., Belhadi S., Lahreche T., 1997, Influence des conditions de coupe sur le comportement à l'usure des forêts hélicoïdaux en acier rapide, 3ème Journée Maghrébines sur la mécanique, Vol. II, Guelma les 29 &30 Avril 1997, pp.643-648.

[9] Jrad M., 2007, "Modélisation du perçage à grande vitesse : Approches analytique, numérique et expérimentale". Thèse de Doctorat, Université de Metz, France.

[10] Khashaba U. A., El-Sonbaty I. A., Selmy A. I., Megahed A. A. 2010 Machinability analysis in drilling woven GFR/Epoxy composites: Part I- Effect of machining parameters. Composites: Part A, 41, pp. 391-400.

[11] Bondarenko D., 2010, "Etude mesoscopique de l'interaction mécanique outil/pièce et contribution sur le comportement dynamique du système usinant », Thèse de doctorat, Grenoble (France) et Université Technique Bauman de Moscou (Russie).

[12] Albert G., Cahuc OLaheurte, R., Darnis P.,2007, Etude expérimentale de la coupe en fraisage, 18ème Congrès Français de Mécanique (CFM07), Grenoble, France 27-31 août 2007

[13] Aslan E., Camuscu N., Birgoren B., 1996, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al_2O_3 + TiCN mixed ceramic tool, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kirikkale University, 71450 Kirikkale, Turkey.

[14] Khashaba U.A., El-Sonbaty I. A., Selmy A. I., Megahed A. A., 2010Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II- Effect of drill wear, Composites: Part A 41, pp. 1130-1137.

©UBMA - 2016