



GM*-3-PROFA Interrogation écrite 2020-2021

Durée 2h

**Procédés de fabrication et mise en forme pour la conception
polycopié de cours**

Documents autorisés :

← Codez votre numéro d'étudiant ci-contre, et écrivez votre groupe, nom et prénom ci-dessous.

<input type="checkbox"/> 0							
<input type="checkbox"/> 1							
<input type="checkbox"/> 2							
<input type="checkbox"/> 3							
<input type="checkbox"/> 4							
<input type="checkbox"/> 5							
<input type="checkbox"/> 6							
<input type="checkbox"/> 7							
<input type="checkbox"/> 8							
<input type="checkbox"/> 9							

Groupe :
Nom :
Prénom :

Les questions peuvent présenter zéro, une ou plusieurs bonnes réponses. Remplir au stylo noir la (les) case(s) correspondante(s) à ce que vous pensez être la (les) bonne(s) réponse(s), pas de croix ni de cases entourées. Des points négatifs pourront être affectés aux mauvaises réponses. Les cadres grisés sont réservés à l'enseignant.

1 Analyse de travaux-pratiques :

L'objectif de l'analyse conduite ici est d'étudier l'usure d'un outil de coupe. Pour cela des essais d'usure ont été réalisés et les résultats vous sont fournis. Il vous sera demandé d'interpréter ces résultats, d'en tirer des conclusions sur l'évolution de l'usure des outils de coupe et de comparer ces résultats à un modèle théorique d'évolution de l'usure. Enfin ces résultats seront utilisés pour la recherche de paramètres de coupes optimaux sur une opération simple.

1.1 Evolution de l'usure des outils de coupe

L'usure de l'outil se manifeste essentiellement sous deux aspects (Fig.1) :

- L'usure "*en cratère*" sur la face de coupe de l'outil, par frottement du copeau. Au cours de l'usure, la profondeur " K_T " et la position du cratère évoluent et influent, en particulier, sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flanc arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise-copeau naturel.
- L'usure *frontale* sur les faces en dépouille, par frottement sur la pièce. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande brillante et striée, parallèle à l'arête. Dans la zone B, la largeur " V_B " de cette bande évolue (dans le temps) parallèlement à la profondeur " K_T " du cratère jusqu'à la destruction de la pointe par la conjonction de ces deux effets.

À noter toutefois :

- l'accroissement de la largeur de la bande d'usure à ses extrémités, due à l'usinage des zones superficielles de la pièce, qui donne lieu à des phénomènes particuliers ;
- dans des conditions de coupe sévères, l'apparition d'une déformation plastique de la pointe de l'outil caractérisée par son affaissement " SV_P " ;
- dans le cas de chocs répétés ou de variations périodiques des efforts (coupe discontinue, vibrations) la possibilité d'un effritement de l'arête de coupe.

Les mesures de l'usure frontale " V_B " en fonction du temps de coupe (Fig.2) permettent en général de suivre l'évolution de l'usure. Cette évolution n'est pas rigoureusement continue et des irrégularités peuvent apparaître autour de la courbe traduisant la tendance moyenne. Dans le cas des outils carbures, on explique l'évolution de cette usure par la superposition de deux types principaux d'usure :

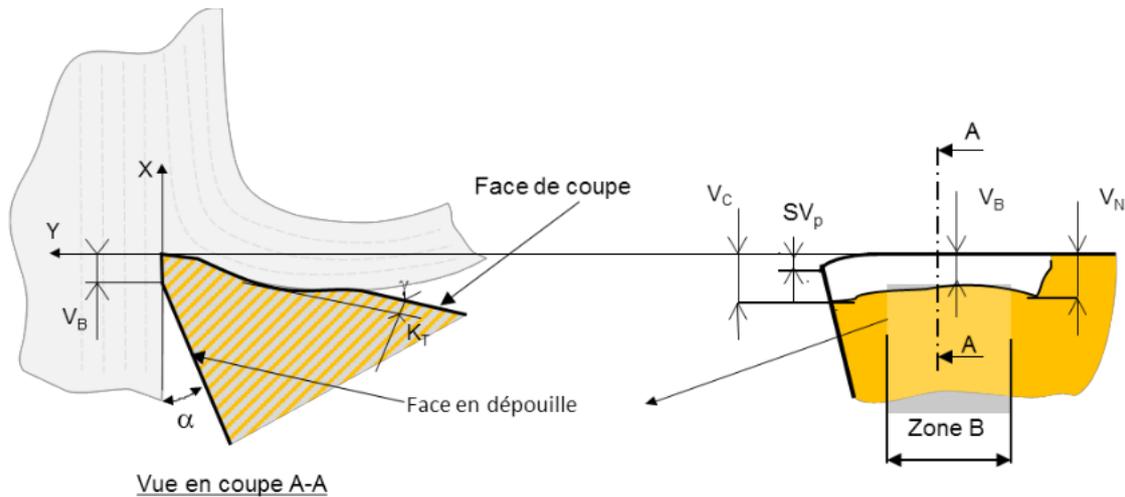
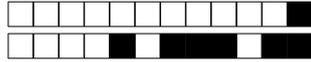


Figure 1: Définition des principaux paramètres caractéristiques de l'usure (suivant normes NF et I.S.O)

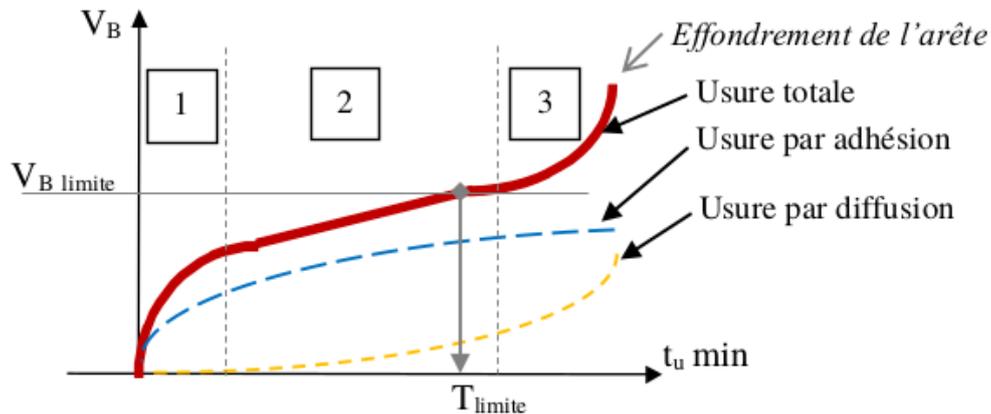


Figure 2: Evolution de l'usure frontale

- l'usure par adhésion favorisée par les pressions locales et les températures importantes.
- l'usure par diffusion, transfert de certains constituants de l'outil dans le copeau, favorisée par les fortes températures à l'interface outil/copeau.

On observe 3 zones :

- Zone 1 : période d'adaptation du tranchant au régime de coupe.
- Zone 2 : Stabilisation du gradient d'usure, évolution sensiblement linéaire en fonction du temps.
- Zone 3 : croissance rapide de l'usure qui précède l'effondrement de l'arête ; dans cette zone les risques de rupture d'outil sont importants.

1.2 Critères d'usure

Les critères usuellement utilisés pour les outils en carbure et, notamment, ceux recommandés par la norme NF E 66 505, sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou de la cratérisation. Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. De plus, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquette carbure

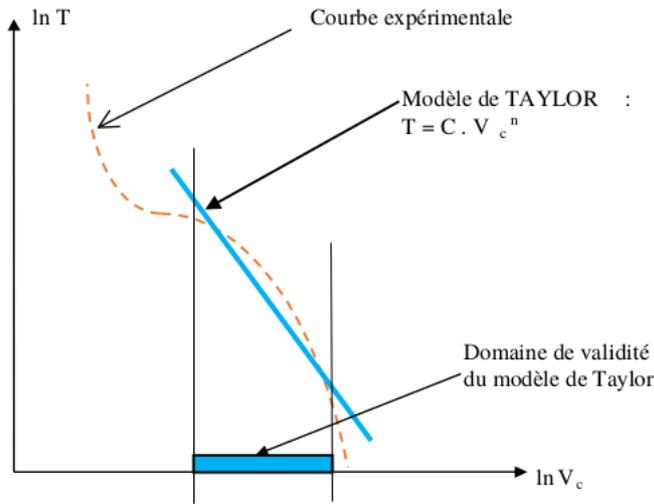


Figure 3: Evolution de l'usure frontale

dite "à jeter", qui permettent de vitesses de coupe élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage des paramètres de coupe. Toutefois, pour des valeurs élevées des paramètres de coupe provoquant une forte élévation de la température à l'interface outil-copeau, l'accélération de l'usure par diffusion devient très sensible, et favorise une évolution rapide de la cratérisation. Le critère principal défini pour les outils carbure et céramique est le suivant :

- largeur de la bande d'usure frontale $V_B = 0,3mm$ si elle est uniforme dans la zone B ;
- sinon, largeur maximale de cette bande $V_B = 0,6mm$.

Ces valeurs limites de V_B correspondent sensiblement à celles relevées à la frontière des zones 2 et 3 de la figure 2, le risque de rupture accidentelle de l'outil pendant la production est ainsi minimisé. La durée de vie de l'outil T est définie à l'instant où le critère maxi est atteint ($V_B = V_{B\text{limite}}$).

1.3 Loi d'usure des outils de coupe

La loi d'usure définit la variation de la durée effective de coupe T des outils en fonction des conditions géométriques et cinématiques de l'usinage. La durée effective de coupe T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par le critère d'usure précédent. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi lesquels le modèle de Taylor (env. 1902):

$$T = C.V_c^n \tag{1}$$

La détermination des coefficients d'un modèle de loi d'usure se fait à partir d'essais à paramètres de coupe constants. Pour chaque jeu de paramètres, la surveillance de l'évolution de l'usure frontale V_B en fonction du temps de coupe permet de définir un point figuratif de la loi d'usure. Ces modèles reflètent correctement la moyenne des résultats expérimentaux dans la plage des paramètres de coupe couramment utilisés, mais peut s'écarter rapidement de la réalité en dehors du domaine exploré, voir fig. 3.

En première approximation, une étude des données de la littérature permet de considérer pour un outil en carbure non revêtu, étudié ici que $n = -4$. De manière remarquable, de nombreuses études ont permis de montrer que la valeur de n dépend quasi exclusivement du matériau constituant l'outil et donc qu'elle est indépendante du matériau usiné.

1.4 Réalisation d'un essai d'usure

L'usure d'un outil en carbure non revêtu (outil COROMANT SNMG 12 04 08-QM H13 A) lors de l'usinage d'un acier XC48 est étudié. Le comportement de l'outil n'est pas connu *a priori*. De expériences sont donc réalisées

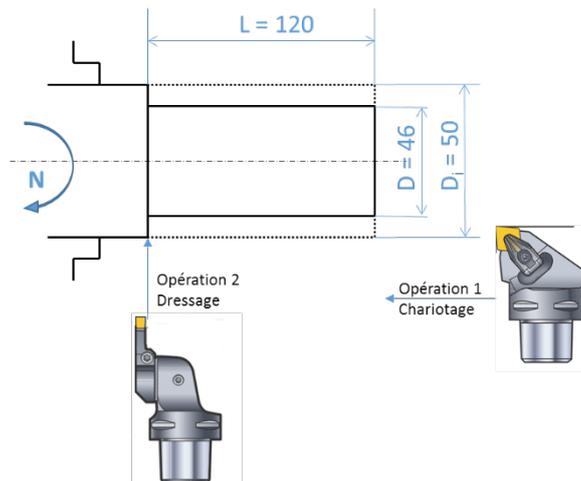
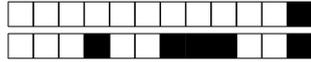


Figure 4: Illustration de l'usinage réalisé pour un essai d'usure.

pour connaître l'évolution de la durée de vie de l'outil en fonction de différents paramètres de coupe. Les différents paramètres de coupe sont considérés comme indépendants. L'objectif est notamment de déterminer si cet outil suit la loi de Taylor. Un premier essai est réalisé avec ($V_c = 160 \text{ m/min}$; $f = 0,15 \text{ mm/tr}$; $a_p = 1 \text{ mm}$). L'essai consiste à usiner en chariotage un rondin en acier XC48 à paramètres de coupe constants et sans lubrification. L'usinage réalisé est représenté en figure 4. Le rondin a un diamètre initial de 100 mm et une longueur utile de 120 mm , il est usiné par passes successives, jusqu'à un diamètre minimum de 60 mm . Cette limite a deux objectifs :

- conserver une pièce de dimensions et de capacité calorifique suffisantes pour ne pas provoquer un accroissement trop important de la température au cours de l'essai, qui modifierait sensiblement le régime d'usure,
- assurer une rigidité convenable de la pièce.

Un programme d'usinage est réalisé permettant d'interrompre l'usinage toutes les 10 s afin de mesurer l'évolution de la bande d'usure V_B sur l'outil puis de reprendre au point précédent. Cette mesure est réalisée en démontant l'outil puis en l'observant au microscope optique. A chaque démontage, l'outil est refroidi à la soufflette à air pour le ramener à température ambiante et éviter à l'opérateur de se brûler. L'évolution de V_B est ainsi tracée en fonction du temps d'usinage jusqu'à obtenir une usure en dépouille V_B de $0,3 \text{ mm}$ en accord avec la norme NF E 66-505.

Les résultats de ce premier essai sont tracés sur la figure ci-dessous. Des barres d'erreurs tenant compte de l'incertitude sur l'outil de mesure sont ajoutées en ordonnée autour de chaque point mesuré.

Dans un premier temps, l'intérêt est porté sur le déroulement de l'essai, les conditions expérimentales et l'analyse de cette première courbe d'usure.

Q1. Sur l'évolution des paramètres de l'opération au cours de l'essai, indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- La vitesse de translation V_f de l'outil augmente au fur et à mesure des passes.
- La vitesse de rotation N de la broche diminue au fur et à mesure des passes.
- La vitesse de translation V_f de l'outil sera constante tout au cours de l'essai.
- La vitesse de rotation N de la broche sera constante tout au cours de l'essai.
- La vitesse de rotation N de la broche augmente au fur et à mesure des passes.
- La vitesse de translation V_f de l'outil diminue au fur et à mesure des passes.

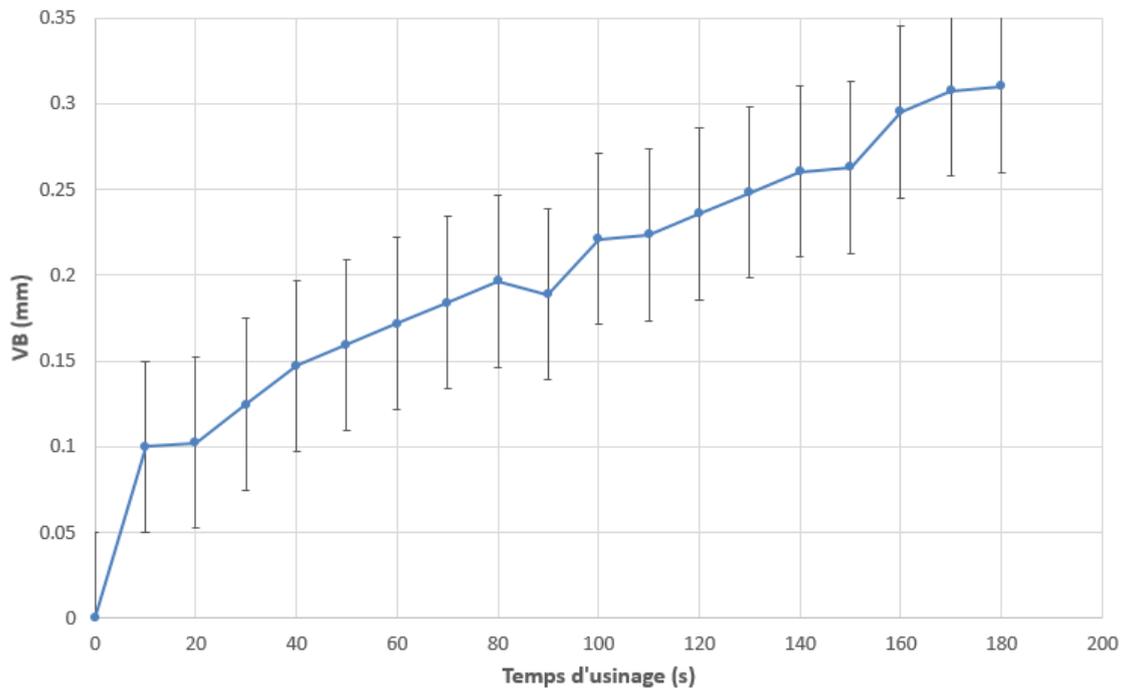


Figure 5: Evolution de l'usure en dépouille en fonction de la durée d'usinage pour $(V_c; f; a_p) = (160; 0, 15; 1)$.

Q2. On s'intéresse aux étapes d'usinage (intervalles de temps de 10 s), indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- Le nombre d'étapes d'usinage doit être un multiple du nombre de passes afin de conserver les paramètres de coupe constants tout au long de l'essai.
- Le nombre d'étapes d'usinage n'est ni égal, ni un multiple du nombre de passes mais cela n'a pas d'influence sur les paramètres de coupe.
- Le nombre d'étapes d'usinage est égal au nombre de passes.

Q3. La température est un paramètre influençant au premier ordre l'évolution de l'usure, l'outil est donc refroidi entre chaque passe mais l'essai est réalisé sans lubrification alors que lors d'un usinage en conditions réelles, une lubrification sera appliquée, indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- Ces deux effets vont tous les deux conduire à sous-estimer la durée de vie de l'outil.
- Ces deux effets vont tous les deux conduire à sur-estimer la durée de vie de l'outil.
- Ces deux effets agissent en sens contraire et peuvent éventuellement se compenser.

Q4. On analyse maintenant la courbe d'évolution de l'usure V_B (fig.5), au regard de la courbe indiquer la(es) réponse(s) correcte(s) :

- L'effondrement de l'arrête a été atteint pendant l'essai
- L'essai a été interrompu alors que l'outil était dans la zone 2 de sa durée de vie
- Il n'est pas possible de conclure sur les types d'usure rencontrés simplement à partir de cette courbe.
- Les deux types d'usure sont observés au cours de l'essai.
- Seule de l'usure par diffusion a été observée au cours de l'essai.
- Seule de l'usure par adhésion a été observée au cours de l'essai.
- Seules les zones 1 et 2 sont observées au cours de l'essai.
- Seule la zone 2 est observée au cours de l'essai.
- La zone 1 a une durée inférieure à 10 s dans ces conditions d'essai.

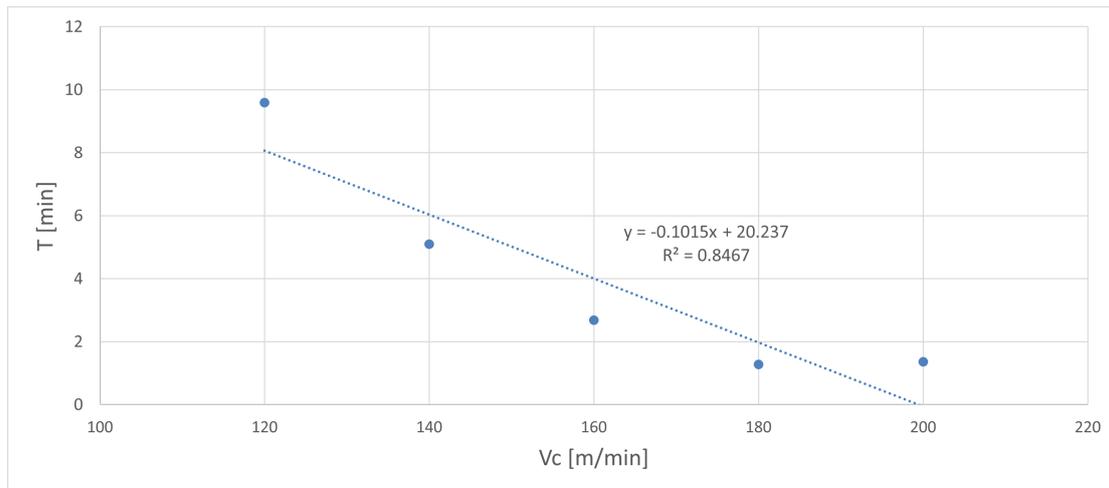
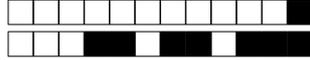


Figure 6: Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe pour f et a_p constants, échelle linéaire.

Q5. Toujours sur la courbe d'évolution de l'usure V_B (fig.5), indiquer la(es) réponse(s) correcte(s), en prenant en compte les barres d'erreurs dans votre analyse:

- Des erreurs de mesure ont été réalisées, le point à $t = 90$ s est nécessairement incorrect.
- L'évolution de l'usure peut être considérée comme linéaire au cours de l'essai.
- Les données expérimentales fournies permettent de définir rigoureusement une durée de vie de l'outil et son incertitude.
- Il aurait fallu prolonger l'essai pour définir rigoureusement la durée de vie de l'outil.

Q6. En rappelant que la durée de vie de l'outil est définie comme le temps nécessaire pour atteindre une valeur de $V_B = 0,3$ mm, indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- L'incertitude sur la durée de vie de l'outil est supérieure à ± 10 s
- L'incertitude sur la durée de vie de l'outil est inférieure à ± 10 s
- L'incertitude sur la durée de vie de l'outil est égale à ± 10 s
- La durée de vie de l'outil est ici égale à 165 s.

La valeur de durée de vie de l'outil T pour ce jeu de paramètres est récupérée. L'influence des barres d'erreurs sur la détermination de T sera négligée pour la suite de l'analyse (il sera considéré que le protocole expérimental permet de déterminer celle-ci avec une incertitude négligeable).

1.5 Analyse de l'influence de la vitesse de coupe.

Quatre autres essais d'usure sont réalisés en faisant varier la vitesse de coupe. L'avance et la profondeur de passe sont maintenues constantes ($f = 0,15$ mm/tr et $a_p = 1$ mm). Les résultats sont tracés sur la figure 6 dans le domaine linéaire et sur la figure 7 en échelle logarithmique. Sur chacune de ces figures, une régression linéaire sur l'ensemble des points a été réalisée, l'équation de la courbe de régression, de même que la valeur du coefficient de corrélation de cette régression R^2 sont affichées. L'objectif est maintenant de déterminer la forme de la loi d'évolution de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe et de comparer aux données de la littérature.

Q7. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- Une augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution de la durée de vie.
- La vitesse de coupe est sans influence sur la durée de vie.
- Une augmentation de la vitesse de coupe conduit à une augmentation de la durée de vie.

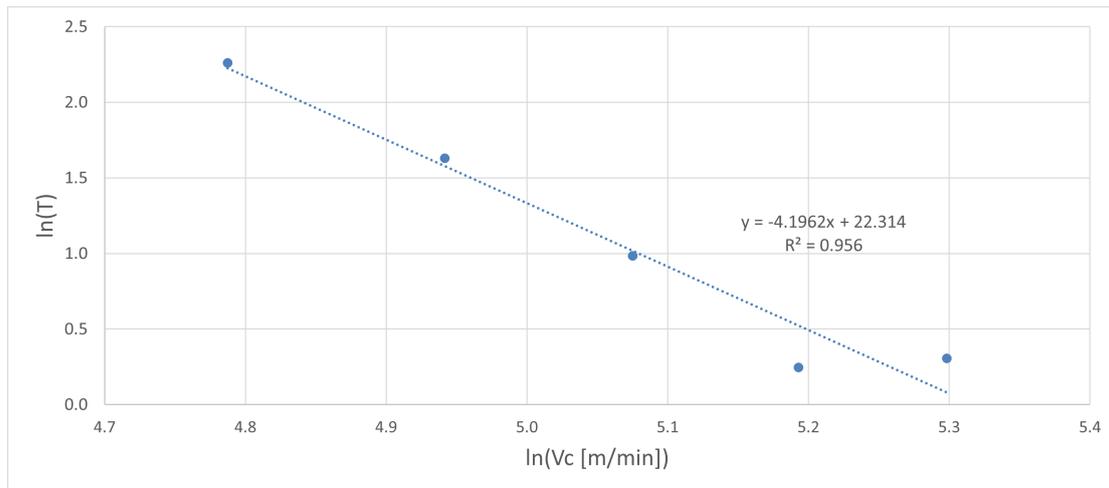


Figure 7: Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe pour f et a_p constants, échelle logarithmique.

Q8. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- L'évolution de la durée de vie T avec V_c suit une loi puissance.
- Il est impossible, avec ces données, de conclure sur l'évolution de la durée de vie T avec V_c .
- L'évolution de la durée de vie T avec V_c est linéaire.
- L'évolution de la durée de vie T avec V_c ne suit aucune loi de forme simple (puissance ou linéaire).

Q9. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s) :

- Les résultats des essais semblent respecter la loi de Taylor.
- Les résultats des essais ne suivent pas du tout la loi de Taylor.
- les résultats fournis permettent d'écrire que la loi durée de vie peut être prédite par $T = -0,1015V_c + 20,237$
- les résultats fournis permettent d'écrire que la loi durée de vie peut être prédite par $\ln(T) = -4,1962\ln(V_c) + 22,314$.

Q10. On compare maintenant les résultats des essais à la loi de Taylor, présentée plus haut. A partir des données d'essais on cherche la meilleure valeur possible pour les coefficients C et n de la loi de Taylor. Indiquer la meilleure valeur pour C selon les résultats expérimentaux fournis:

- $C = 4,91E + 09$
- $C = 20,237$
- $C = 6,15E + 08$
- Aucune de ces valeurs n'est cohérente avec les résultats obtenus.
- $C = 3,01$
- $C = 3,11$
- $C = 22,314$



Q11. Toujours en comparant les résultats des essais à la loi de Taylor, indiquer la meilleure valeur pour n selon les résultats expérimentaux fournis:

- $n = -4,1962$
- $n = -0,1015$
- $n = 1,51E - 02$
- $n = 9,03E - 01$
- Aucune de ces valeurs n'est cohérente avec les résultats obtenus.

Q12. On applique maintenant le modèle de durée de vie obtenu pour prédire la durée de vie de l'outil pour $V_c = 50 \text{ m/min}$, indiquez la plus proche valeur de durée de vie ainsi calculée :

- 100 min
- 500 min
- 20 min
- 0,2 min
- 50 min
- 0,5 min
- 9 min
- 1 min
- 200 min
- 0,1 min

Q13. On s'intéresse enfin au domaine de validité de la loi de Taylor ainsi obtenue, indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- Le modèle déterminé est valable quelle que soit la vitesse de coupe.
- Le modèle déterminé est au moins valable pour une vitesse de coupe comprise entre 160 et 200 m/min .
- Le modèle déterminé est valable pour toute vitesse de coupe supérieure à 200 m/min .
- Le modèle déterminé est valable pour toute vitesse de coupe inférieure à 160 m/min .
- Le modèle déterminé est valable uniquement pour une vitesse de coupe comprise entre 160 et 200 m/min .

1.6 Analyse de l'influence de l'avance.

Cinq essais complémentaires sont réalisés en faisant varier l'avance. La profondeur de passe est maintenue constante ($a_p = 1 \text{ mm}$), la vitesse de coupe est prise égale à 160 m/min . Les résultats sont tracés sur la figure 8 dans le domaine linéaire et sur la figure 9 en échelle logarithmique. L'objectif est maintenant de déterminer l'influence du paramètre d'avance sur l'usure et les possibilités de généralisation du comportement.

Q14. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- L'avance est sans influence sur la durée de vie.
- Une augmentation de l'avance conduit à une diminution de la durée de vie.
- Une augmentation de l'avance conduit à une augmentation de la durée de vie.

Q15. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- L'évolution de la durée de vie T avec f suit un comportement différent qu'avec V_c
- L'évolution de la durée de vie T avec f suit le même type de comportement qu'avec V_c .
- Il est impossible, avec ces données, de conclure sur l'évolution de la durée de vie T avec f .

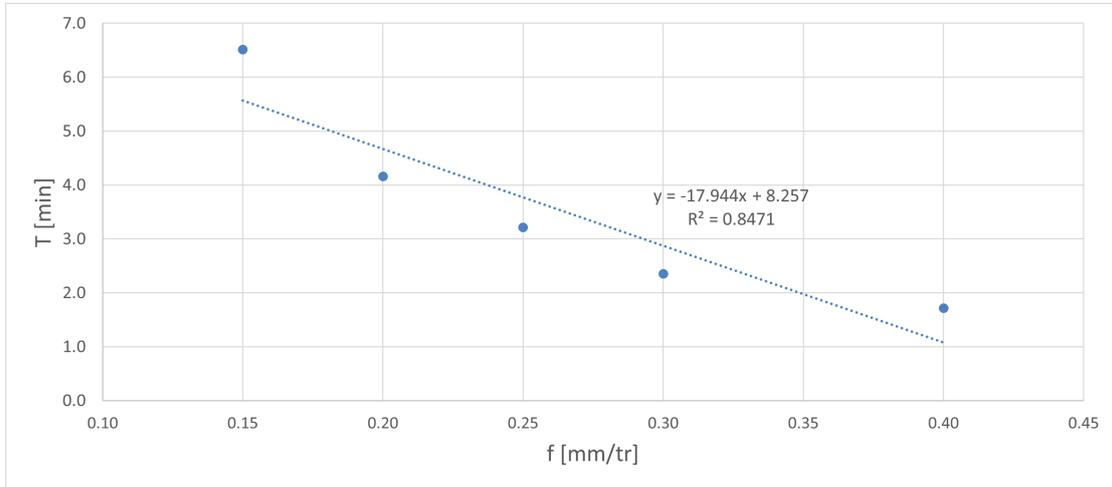


Figure 8: Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de l'avance pour V_c et a_p constants, échelle linéaire.

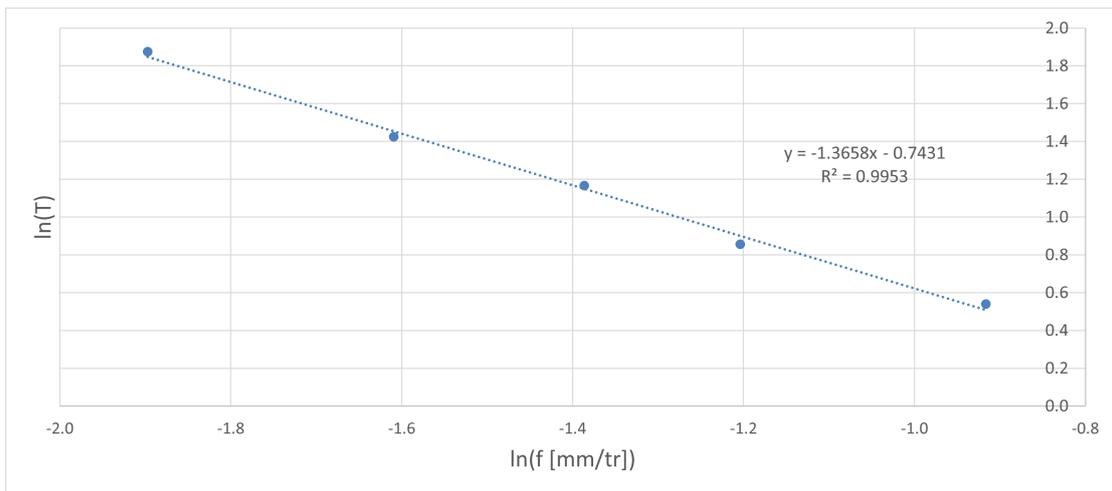
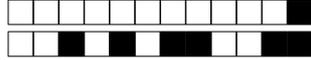


Figure 9: Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de l'avance pour V_c et a_p constants, échelle logarithmique.



Q16. Indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- L'influence de f sur T est plus importante que celle de V_c (doubler f aura plus d'impact sur T que doubler V_c).
- Les influences de V_c et f sur T sont comparables.
- L'influence de V_c sur T est plus importante que celle de f (doubler V_c aura plus d'impact sur T que doubler f).

Q17. Au regard des résultats expérimentaux et en s'intéressant dans un premier temps uniquement à l'influence de f sur T (en supposant V_c toujours constant), quel(s) modèle(s) vous semble(nt) le(s) plus approprié(s) pour décrire T :

- $T = B.f^m$ avec $m = n$
- $T = A.f + D$
- $T = B.f^m$ avec $m \neq n$

Q18. En supposant que les effets de V_c et f sont indépendants, indiquer la(es) réponse(s) correcte(s):

- Il faut plus d'essais pour conclure.
- La durée de vie de l'outil peut être prédite par une loi du type $T = K.(V_c.f)^n$.
- La durée de vie de l'outil peut être prédite par une loi du type $T = K.V_c^n.f$.
- La durée de vie de l'outil peut être prédite par une loi du type $T = K.V_c^n.f^m$.