

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET ANALYSES

#### 3.1 Fraisage des alliages d'aluminium

Nous avons repris les résultats du perçage d'aluminium de Balout [37] pour vérifier si les comportements du matériau restent inchangés en fraisage. De plus, nous avons fait le perçage d'alliage de cuivre.

La figure 23 montre un exemple typique de l'évolution de la concentration de poussières en fonction du temps. L'acquisition des données commence 20s avant le début de la coupe. La concentration de la poussière mesurée atteint, dans tous les cas, un maximum. L'existence de ce maximum sera expliquée plus loin dans le mémoire.

La concentration de poussières moyenne est obtenue par lecture directe de l'appareil de mesure. C'est cette valeur qui a été prise en considération pour analyser les tendances de la génération de poussières.

Plusieurs mesures de l'émission de poussières sont possibles : aucune ne donne des valeurs réelles de la quantité de matière produite. Pour cela, il faudrait être capable de récupérer toutes les particules produites, ce qui est impossible. Il faut faire un choix. Pour contourner ce problème délicat de la mesure, nous proposons une échelle "standard" de mesure (chapitre 4 paragraphe 4.8).

La mesure choisie de la quantité de poussière est celle appelée mesure moyenne de la concentration. Elle s'exprime en mg de poussière par m<sup>3</sup> d'air pompé à travers le filtre. Cette mesure exprime la valeur moyenne de toutes les mesures faites pendant l'usinage. C'est une mesure qui permet de comparer les émissions pour toutes les expériences

réalisées dans les mêmes conditions de vitesse, d'avance, etc. Nous aurions pu choisir la quantité totale de poussières émises, mais nous avons préféré choisir une mesure plus généralement acceptée. Ces deux mesures sont évidemment reliées à condition que la façon dont le prélèvement est effectué demeure la même. Soulignons que ces deux mesures, moyenne ou totale, ne changent pas le classement relatif des matériaux du point de vue de leur pouvoir émissif. Si le matériau A émet deux fois plus de poussières que le matériau B, cela restera vrai quelque soit la mesure choisie. Cette explication (il faut que le prélèvement se fasse dans des conditions définies) souligne la difficulté de mesure de la poussière et la nécessité de définir une échelle de mesure du pouvoir émissif (voir chapitre 4).

### **3.2 Influence des paramètres expérimentaux en fraisage**

La figure 23 représente une courbe typique de génération de poussières. La concentration mesurée de la poussière est fortement influencée par la forme de la chambre (géométrie de la boîte récupératrice), de l'état de l'environnement dans lequel les tests se déroulent, de la position du tuyau canalisateur des particules de poussières. Cependant l'allure de la courbe reste la même que ce soit en perçage ou en fraisage quelque soit le matériau usiné. La forme de cette courbe est aussi indépendante de la géométrie de la boîte de collection, du type d'usinage (perçage, fraisage). La forme de la courbe  $P(t)$  est donc caractéristique de la mesure.

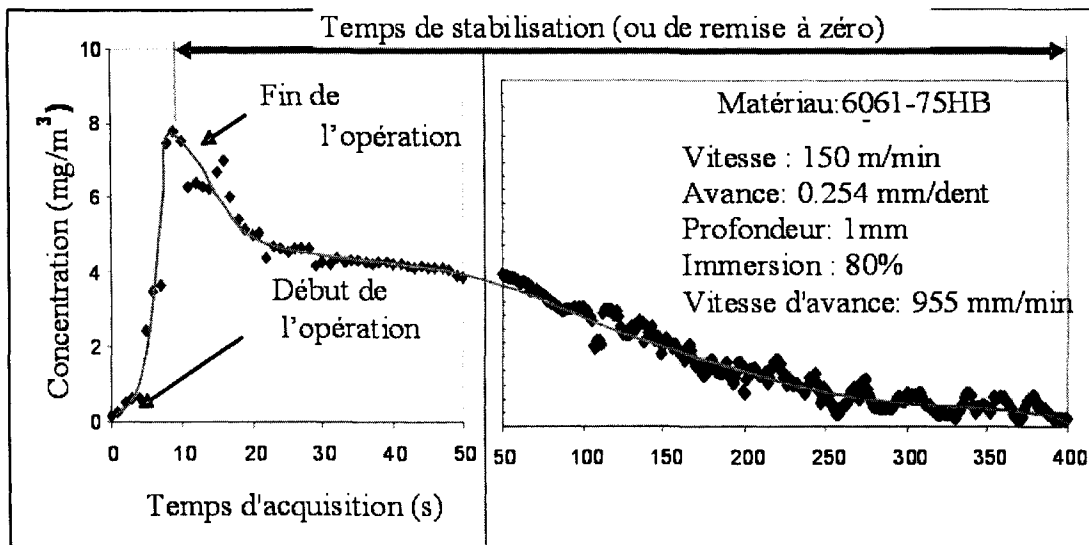


Figure 23 Courbe typique de la génération de quantité de poussières (mg.s/m<sup>3</sup>)

L'augmentation de la vitesse de coupe pendant le fraisage des alliages d'aluminium influence fortement la génération de poussière pour les alliages de corroyage et a peu d'influence pour les alliages de fonderie. D'une façon plus globale, ceci est montré dans la figure 24.

On peut généraliser ce résultat: « les alliages de fonderie » émettent moins de poussières que les alliages de corroyage et la vitesse de coupe a une faible influence sur la génération de poussières pour les alliages de fonderie alors que pour les alliages de fonderie l'influence est grande. Ce commentaire sera repris dans la discussion.

D'une façon traditionnelle l'usinabilité d'un matériau se fait par la mesure des forces et les mesures de l'usure de l'outil. À ces critères il faut ajouter le cas de l'usinage à sec avec l'émission de la poussière.

Les alliages de fonderie qui produisent les copeaux courts sont donc du point de vue de forces et de l'émission de poussières les alliages de bonnes usinabilités.

Les trois critères : force, poussières et usure de l'outil sont donc indépendants les uns des autres. Dans le cadre du présent travail, on s'est surtout concentré sur l'interrelation entre certains de ces critères insistant sur le fait qu'ils ne sont pas reliés.

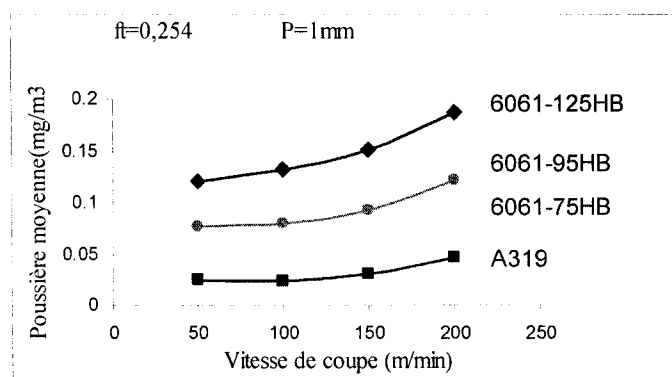


Figure 24 Quantité de poussières en fonction de la vitesse de coupe

La figure 25 souligne l'influence de la profondeur de coupe. La même constatation s'impose, « les alliages à tendance fragile émettent moins de poussières que ceux qui sont plus ductiles et les paramètres de coupe exercent moins d'influence ».

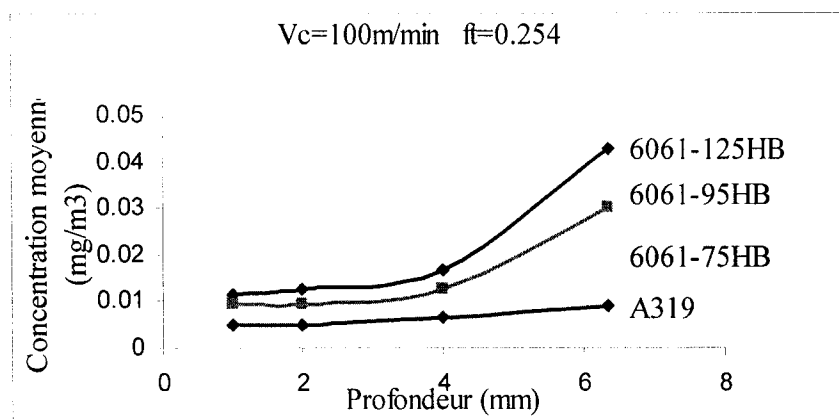


Figure 25 Quantité de poussières en fonction de la profondeur de coupe

L'erreur-type moyen de mesure de la concentration de poussières dans l'air lors du fraisage des alliages d'aluminium a été de  $0,027 \text{ mg/m}^3$ .

Les figures 26 à 27 montrent les micrographies de copeaux des différents alliages d'aluminium. Ces figures font ressortir l'état fragile ou ductile des copeaux après usinage (quantité d'écaillés sur une surface donnée du copeau). Cette propriété de fragilité ductilité laisse ressortir les couches sur les alliages de fonderie et des toits d'usure sur les alliages de corroyage (l'avance utilisée est de  $0,254$ ).

Ces figures montrent l'état des copeaux de la face interne et externe du 6061-95HB et du A319 après usinage : les faces internes brillantes sont celles en contact avec l'outil de coupe, alors que les faces externes sombres montrent la formation de faciès provenant du pliage important de copeau, on peut observer, surtout pour le A319, la présence de fissures. Dans le chapitre discussion nous expliquerons l'effet de l'écaillage du copeau de chacun des alliages sur la production de poussières.

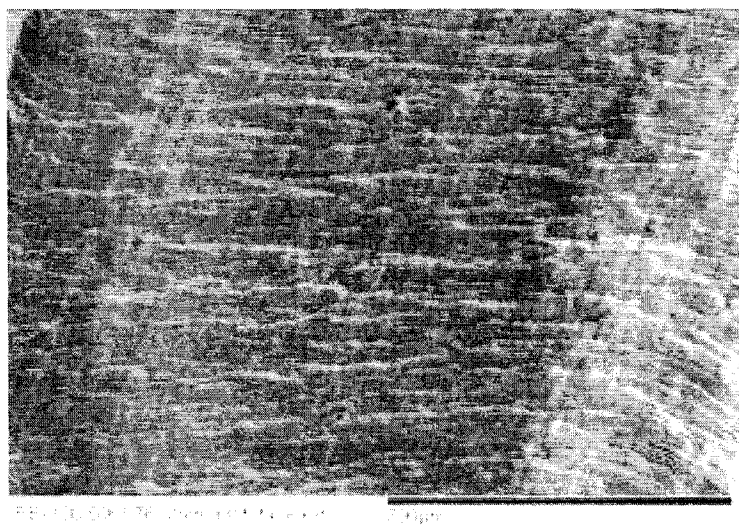


Figure 26 Face externe du copeau du 6061-95HB à 6.35mm

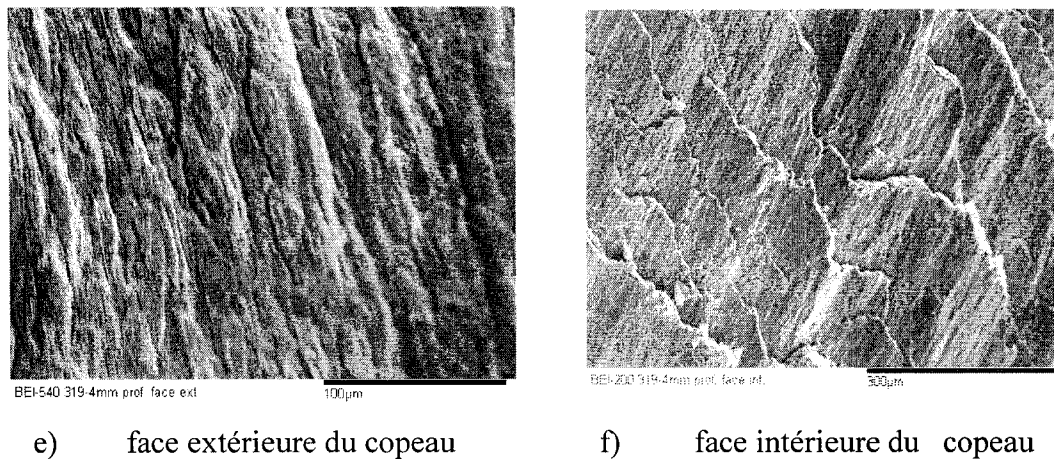


Figure 27 Face interne et externe du copeau du A319 à 6.35mm

La figure 28 montre l'évolution de la concentration de poussières en fonction de la dureté des matériaux. La dureté semble avoir une influence sur la concentration de poussières produites en fraisage des alliages d'aluminium.

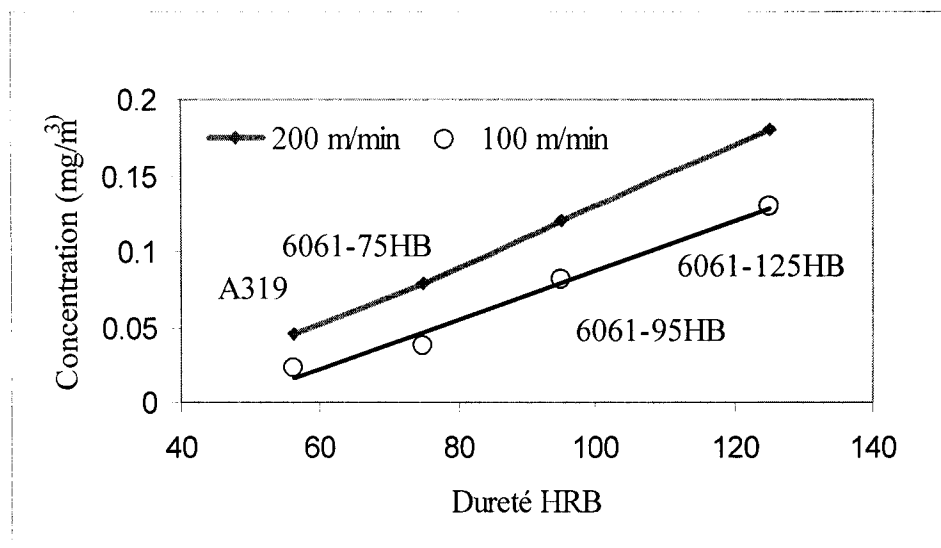


Figure 28 Évolution de la concentration en fonction de la dureté

### 3.3 Perçage des alliages de cuivre

L'augmentation de l'avance de 0,11 à 0,22 tr/min influence faiblement la génération de poussières lors du perçage des alliages de laiton. La figure 29 montre que le C360A génère un peu plus de poussière que le C661T, C694 et le C642 A, mais la différence est faible.

L'erreur-type moyen de mesure de la concentration de poussières dans l'air lors du perçage des alliages de cuivre a été de  $0,009 \text{ mg/m}^3$ .

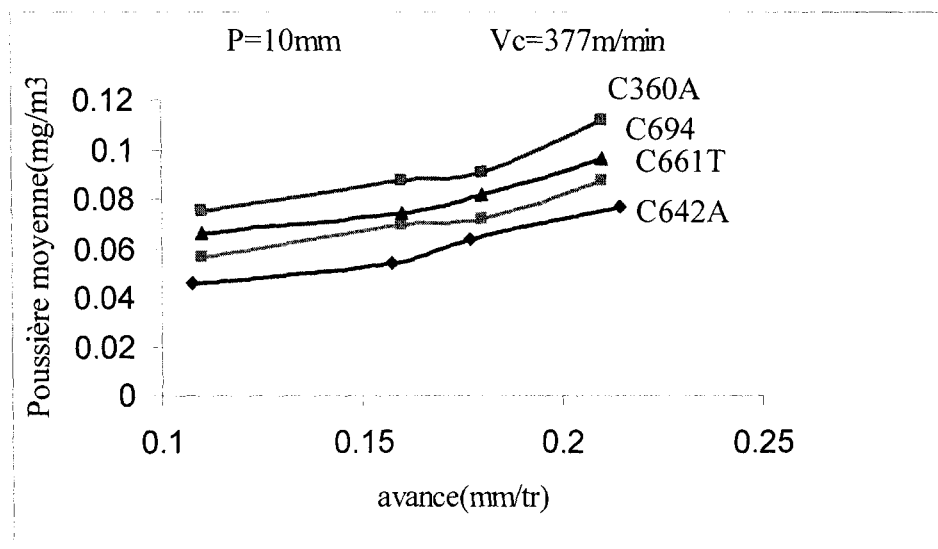


Figure 29 Influence de l'avance par tour sur la poussière

La figure 30 montre la variation de poussières émise en fonction de la vitesse de coupe. Cette émission passe par un maximum pour une vitesse de 250 m/min, quelque soit l'alliage. De plus, les quatre matériaux sont ductiles, ce qui explique la forme des courbes (voir paragraphe discussions).

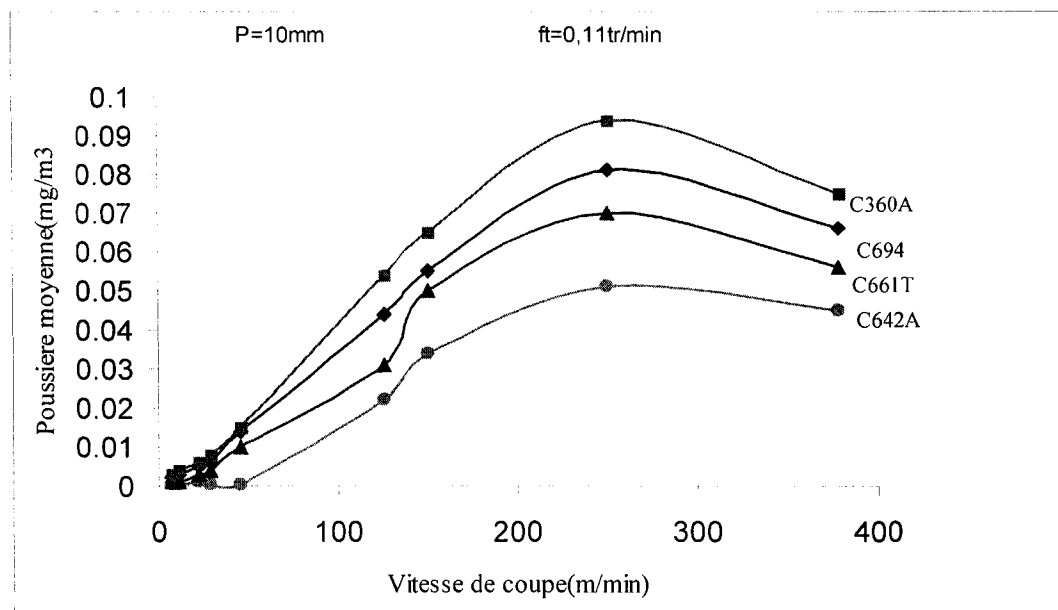


Figure 30 Influence de la vitesse de coupe sur la poussière

La figure 31, montre que les efforts de coupe diminuent à des très basses vitesses. Il est à souligner que les vitesses inférieures à 20 m/min sont peu utilisées en usinage aujourd'hui.

D'un point de vue théorique, la chute des efforts de coupe en fonction de la vitesse marque la fin du stade I. La variation de la force est peu fonction de la vitesse de coupe dans le stade I. Ce résultat a été largement démontré. Pour de très faibles vitesses de coupe, les forces augmentent. La variation du mécanisme de coupe sera étudiée en détail ultérieurement.



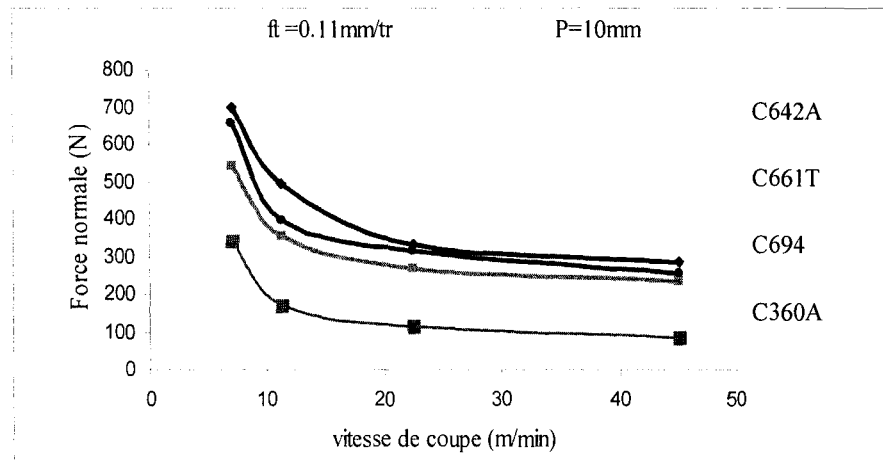


Figure 31 Influence de la vitesse sur les efforts de coupe

La figure 32 montre que le C642A est l'alliage qui nécessite le plus d'efforts de coupe. On peut établir un classement de l'usinabilité des alliages, classement qui est qualitatif: C360; C694; C661; C642. Cette classification sera reprise plus loin.

L'augmentation de l'avance lors des opérations de perçage des alliages du laiton, entraîne une croissance non négligeable des efforts de coupe.

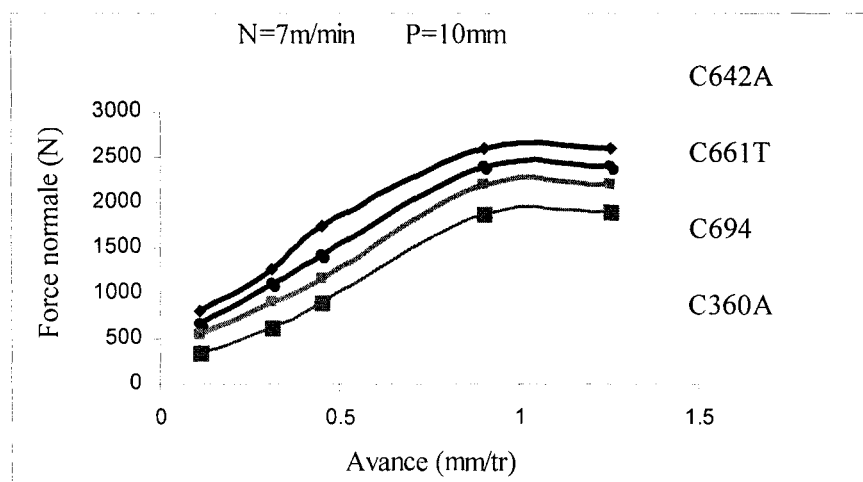


Figure 32 Influence de l'avance par tour sur les efforts de coupe

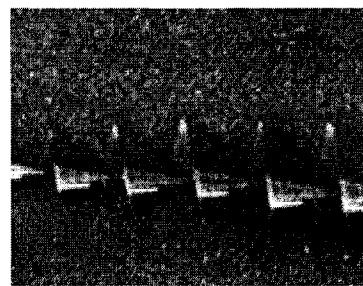
L'évolution de la force peut se décrire par une relation puissance (Voir mémoire de Balout [56]) :  $F = A \cdot V^n$

Les figures 33 à 35 montrent l'état du copeau (forme longue ou courte) des alliages du cuivre à différentes vitesses de coupe. Pour des avances comparables, le copeau est fragile à basse vitesse, et devient ductile à plus haute vitesse.

L'analyse de copeaux permet de trouver l'intervalle de vitesse où la concentration de poussières est maximale avec formation de copeaux longs est caractéristique de l'émission de beaucoup de poussière tandis que la concentration de poussières est minimale : la formation de copeaux courts.



$V_c = 125 \text{ m/min}$

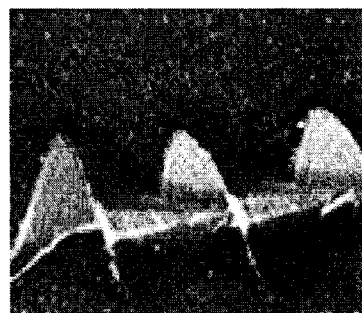


$V_c = 250 \text{ m/min}$

Figure 33 Copeau du C661T à 125m/min et 250 m/min (50X)



$V_c = 125 \text{ m/min}$

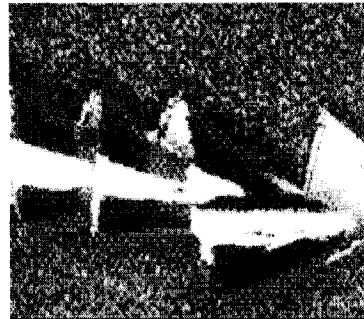


$V_c = 250 \text{ m/min}$

Figure 34 Copeau du C360A à 125 m/min et 250 m/min (50X)



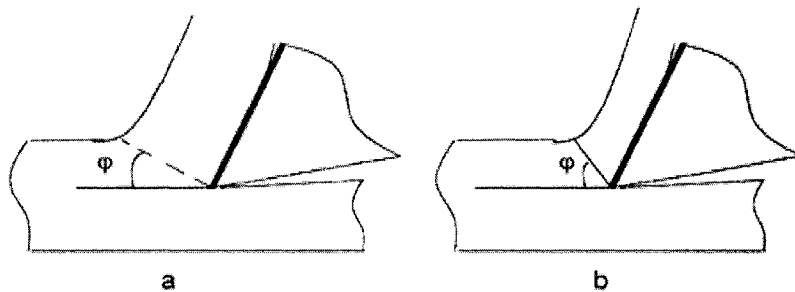
$V_c = 125 \text{ m/min}$



$V_c = 250 \text{ m/min}$

Figure 35 Copeau du C694 à 125 m/min et 250 m/min (50X)

La figure 36 montre le mode de formation des copeaux à basse et à haute vitesse de coupe.



Basse vitesse de coupe

Haute vitesse de coupe

Figure 36 Formation des copeaux en fonction de la vitesse

### 3.4 Tests d'écrasement

Les courbes brutes sont obtenues à partir des données expérimentales  $F(\delta)$  [force déplacement]. Cette courbe est convertie en  $\sigma(\varepsilon)$ .

Le calcul de la contrainte et de déformation ( $\sigma$  et  $\varepsilon$ ) au point A nous permet de déterminer la ténacité des matériaux afin de les classer. Pour ce calcul, il a fallu assimiler le phénomène à un pliage.

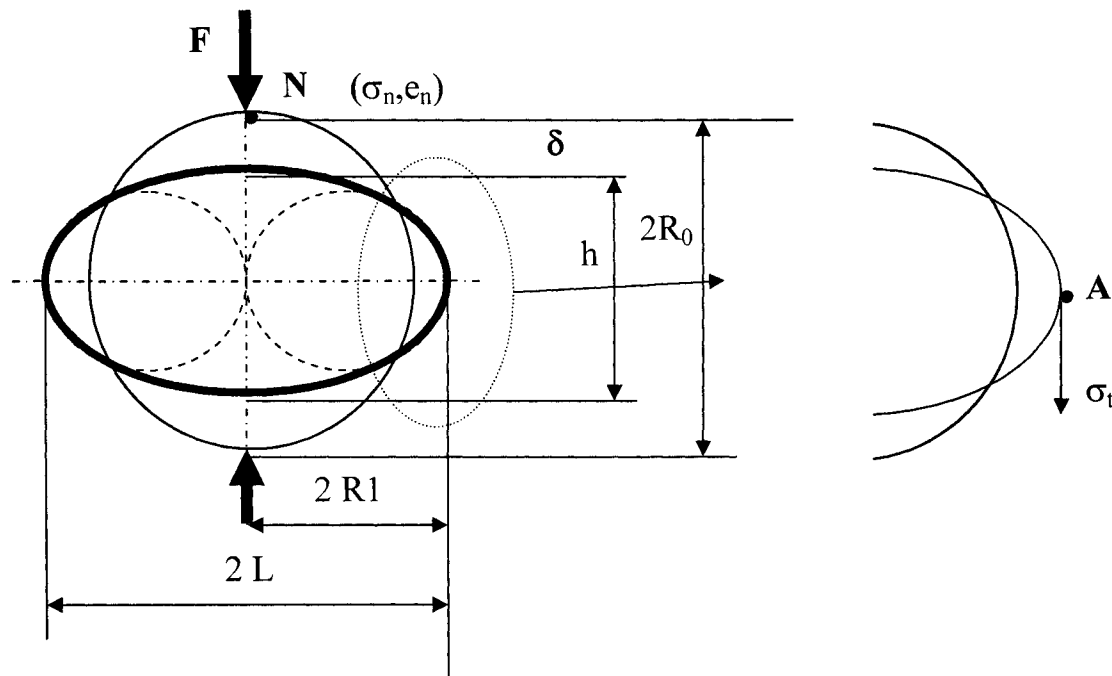


Figure 37 Schématisation du principe d'écrasement

Le développement suivant permet de trouver la contrainte tangentielle et la déformation au point A .

Posons pour des raisons de simplification :  $L = a$ , et  $h/2 = b$

Le déplacement  $\delta$  est donné par :

$$\delta = R_0 - \frac{h}{2} \quad (3)$$

Implique

$$h = 2(R_0 - \delta) \quad (4)$$

$$h + 2 \times \delta = 2 \times R_0 \quad (5)$$

Par hypothèse de conservation de volume et l'approximation sur la circonférence de l'ellipse est donné par la formule de Ramanuja suivante.

$$C_1 \approx \pi \left[ 3(a+b) - \sqrt{(3 \times a + b) \times (a + 3 \times b)} \right] \quad (6)$$

Celui du cercle est donné par :

$$C_2 = 2 \times \pi \times R_0 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \pi \left[ 3\left(L + \frac{h}{2}\right) - \sqrt{\left(3 \times L + \frac{h}{2}\right) \times \left(L + \frac{3}{2}h\right)} \right] = 2 \times \pi \times R_0$$

$$\Rightarrow R_0 = \frac{3}{2}\left(L + \frac{h}{2}\right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left(3 \times L + \frac{h}{2}\right) \times \left(L + \frac{3}{2}h\right)} \quad (8)$$

$$\text{Avec } h = 2(R_0 - \delta) \text{ et } L = 2 \times R_1 \quad (9)$$

On obtient alors :

$$R_0 = \frac{3}{2}(2 \times R_1 + R_0 - \delta) - \frac{1}{2} \sqrt{(6 \times R_1 + R_0 - \delta) \times (2 \times R_1 + 3(R_0 - \delta))} \quad (10)$$

On peut résoudre aisément cette équation pour trouver la valeur de  $R_1$ . La résolution donne deux racines, une positive et une négative qu'on doit exclure, on aura donc :

$$R_1 = \frac{\sqrt{(4R_0^2 + 4\delta R_0 - 5\delta^2)} + R_0 + 2\delta}{6} \quad (11)$$

Hypothèse : La déformation de la bague est similaire à un pliage (cintrage)

$$\text{Schey : } e_t = \frac{1}{2 \times \frac{R_1}{t} - 1} \quad [54], \text{ P.397-402} \quad (12)$$

En restant dans le domaine élastique et en appliquant la loi de Hooke ( $\delta = e_t \cdot E$ ), on obtient la contrainte tangentielle :

$$\sigma_t = \frac{3t}{\sqrt{4R_0(R_0 - \delta) - 5\delta^2} + R_0 + 2\delta + 3t} \times E \quad (13)$$

(Avec  $\delta$  –déplacement,  $\sigma$  –contrainte tangentielle,  $R_0$ -rayon du grand cercle,  $R_1$ -rayon du petit cercle,  $t$ - épaisseur de la bague). Le module d'élasticité du laiton étant 110 GPa et celui de l'aluminium de 69 GPa.

Ce développement nous permettait de trouver la contrainte et la déformation au point A où la concentration de contrainte semble être maximale. Cependant la déformation avec cette formule s'applique au domaine élastique. Puisque nous n'avons pas l'état de déformation en A et que cette déformation dépend de l'état en N, nous appliquons la formule classique de calcul de contrainte au point N :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (14)$$

F étant la force appliquée en (N) pour écraser l'échantillon.  $S_0$  étant la surface de contact mors-bague. D'après Bayoumi [54], l'arc de contact est relié au déplacement  $\delta$  et vaut  $0.5 \times \pi \times \delta$ . Connaissant la hauteur de la bague (largeur de contact), on peut donc écrire que la surface de contact (qui varie avec  $\delta$ ) est donnée par :

$$S_0 \approx \frac{\pi}{2} \times \delta \times H \quad (15)$$

H la hauteur de la bague

$\delta$  le déplacement en mm,

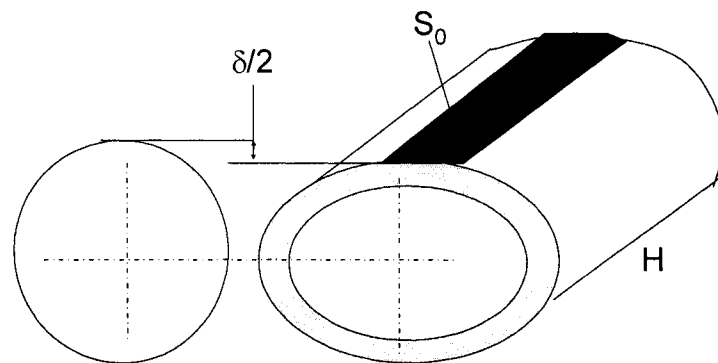


Figure 38 Surface de la bague écrasée

Les figures 39 à 43 présentent les courbes de contraintes et déformations estimées au point N d'application de la charge (figure 37), pour tous les alliages de cuivre testés. La ténacité des matériaux est ensuite évaluée en calculant l'aire sous chacune de ces courbes en utilisant la méthode de Simpson.

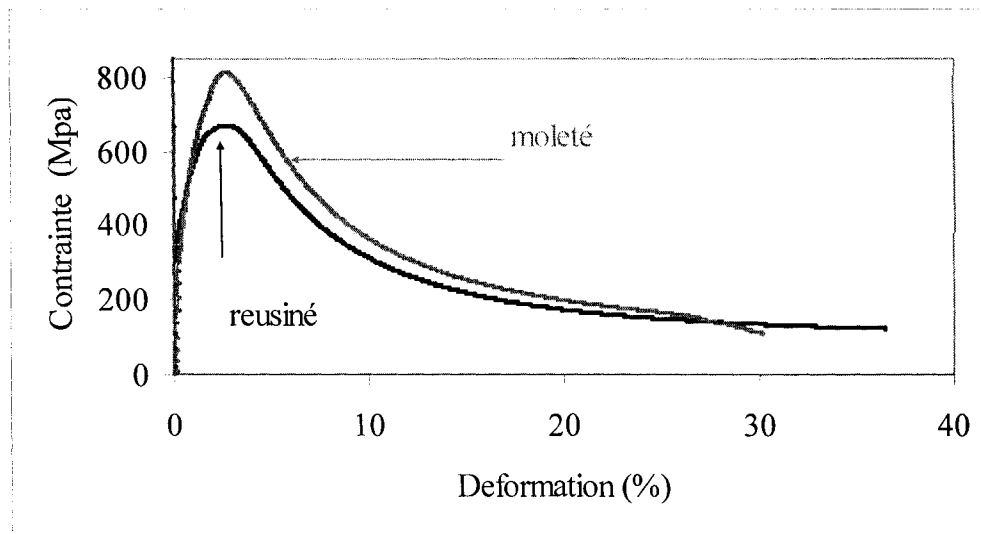


Figure 39 Contrainte en fonction de la déformation du C642A Ré usiné et moleté

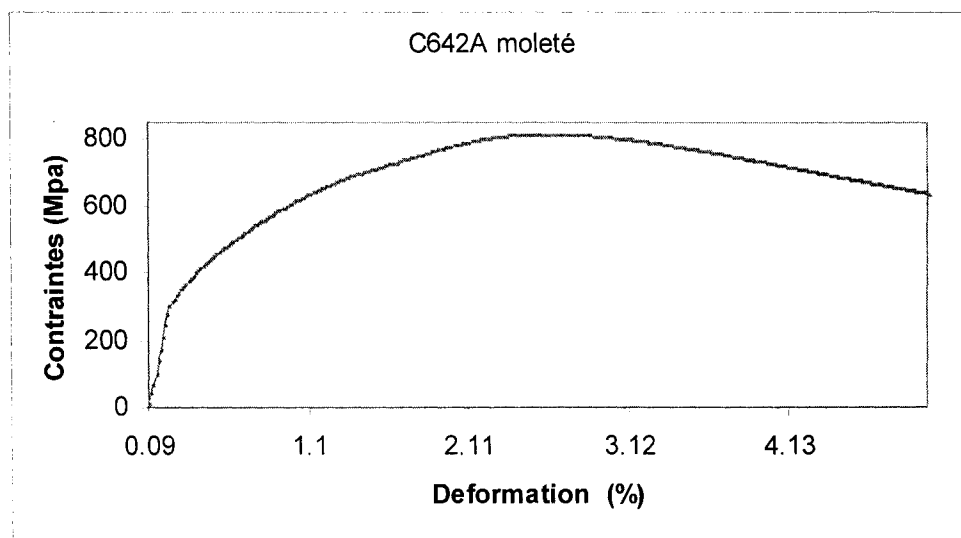


Figure 40 Contrainte en fonction de la déformation basse du C642A

La contrainte maximale est atteinte aux environs de 2.5% de déformation (Figure 40). À partir de ce point la déformation plastique est non uniforme. La même forme de courbe a été obtenue pour tous les alliages de cuivre testés.



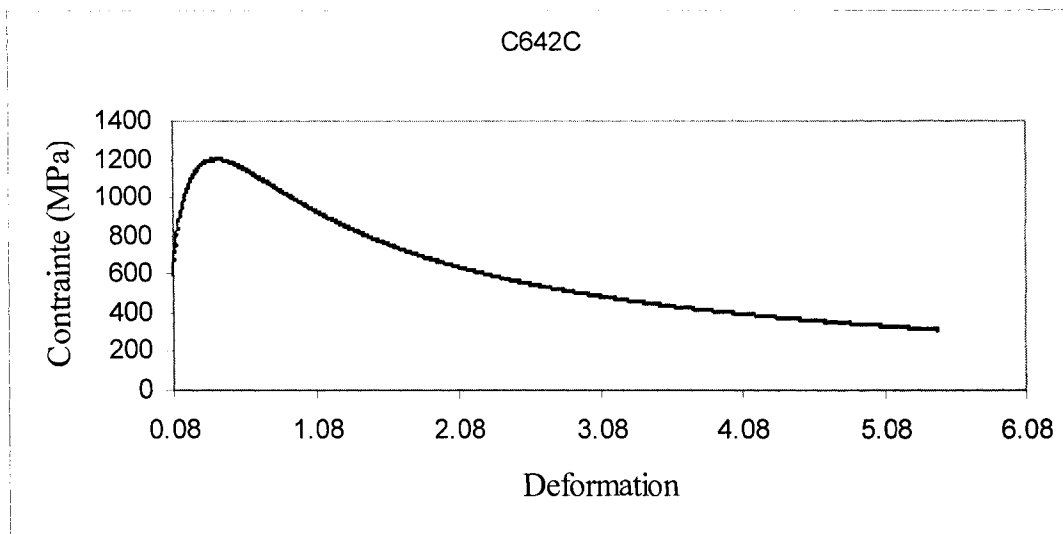


Figure 41 Contrainte en fonction de la déformation du C642C non moleté

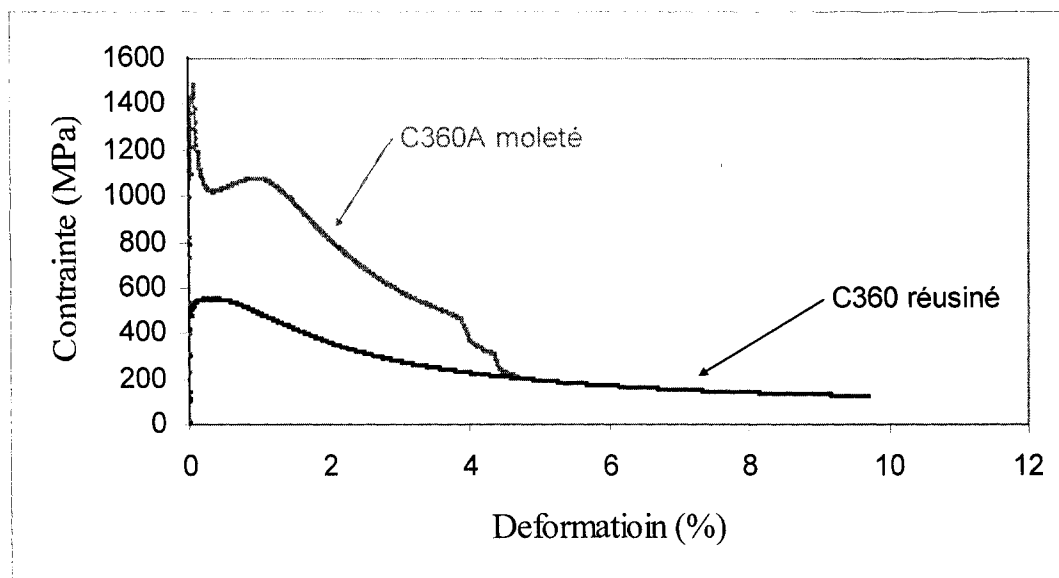


Figure 42 Contrainte en fonction de la déformation du C360A

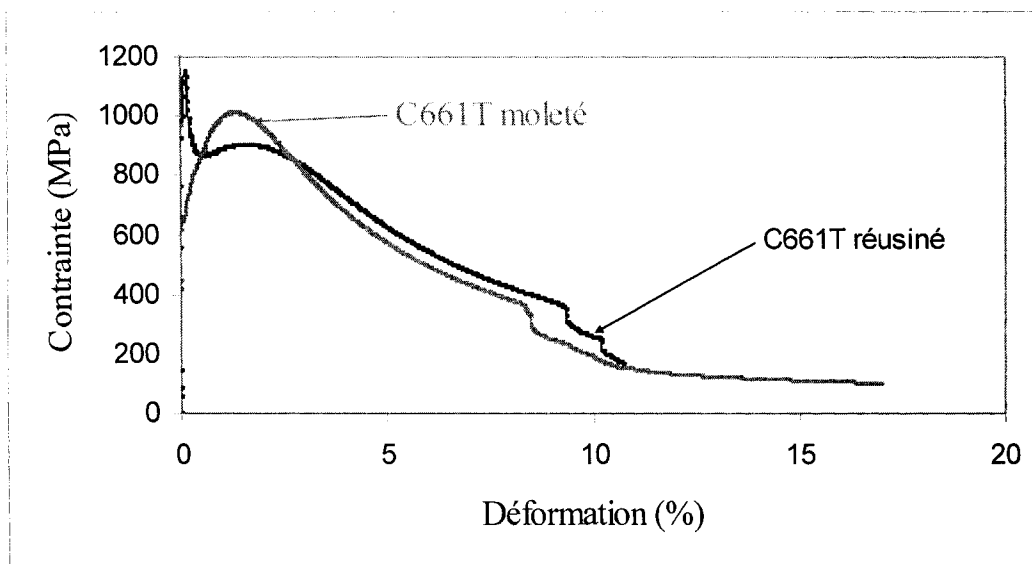


Figure 43 Contrainte en fonction de la déformation du C661T

Ce test de l'écrasement nous a permis d'évaluer plus facilement la ténacité. Plus simplement par le produit  $R_m * A\%$ , qui donne l'énergie dépensée pour initier et propager une fissure jusqu'à rupture totale (figures 39-43). Le tableau VIII présente certains alliages en fonction de ce critère. Le test de l'ASTM E-399 qui mesure la ténacité est fiable mais dispendieux et qui ne tient pas compte de la présence de défaut du type impureté de plomb. La simplicité est le principal avantage de notre test d'écrasement, le fait qu'il tient compte de défaut éventuel puisque l'initiation a lieu sur une grande surface. De plus l'initiation se fait en tension, ce qui est proche des conditions réelles. Cette mesure est inhabituelle mais présente un intérêt pratique important pour les connaissances des causes d'émissions de poussières. En effet les modes de définition sont proches: frottement et plan de rupture.

La figure 44 montre que la corrélation entre poussiérabilité et dureté dépend du matériau et que, les matériaux les plus tenaces peuvent émettre moins de poussières selon les conditions alors que ceux les moins tenaces en produisent plus de poussières. L'alliage

C694 est une singularité dans l'évaluation de la dureté. Ceci est illustré dans la figure suivante :

Les valeurs des quantités de poussières sont celles de l'intervalle de production maximale ( $V_c = 250\text{m/min}$  et  $f_t = 0.11\text{ mm/tr}$ ).

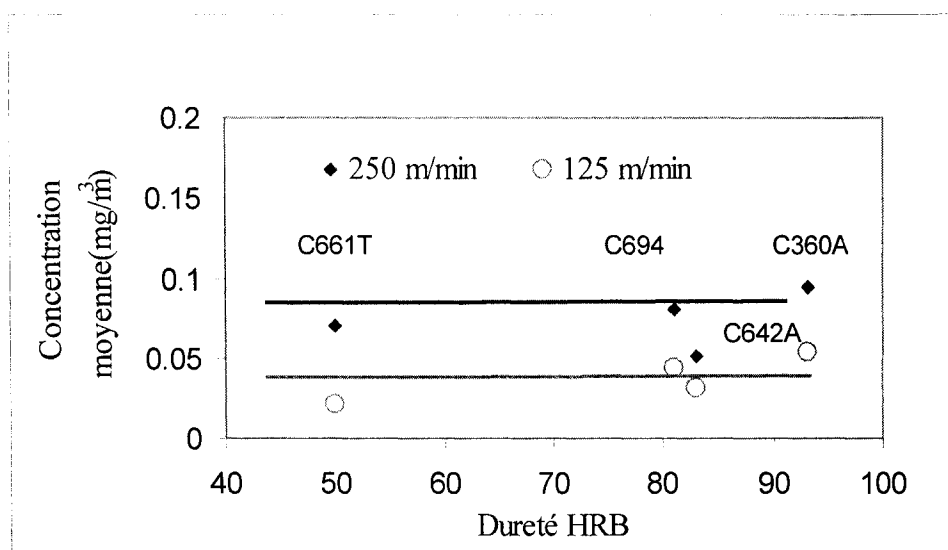


Figure 44 Corrélation entre concentration et dureté de cuivre

Le tableau VIII présente valeurs des ténacités des alliages moletés, des alliages réusinés, du produit  $R_m \cdot A\%$  fourni par les fabricants des différents alliages.

Tableau VIII  
Ténacités des alliages moletés et ré usinés

Alliages	Ténacité des moletés (N) ( $J/m^3$ ). $10^6$	Ténacité des ré usinés (M) ( $J/m^3$ ). $10^6$	Ténacité Rm* A% ( $J/m^3$ ). $10^6$
C360A	34	23	13
C642A	99	95	24
C661T	65	68	-----
C642C	-----	33	1
C661A	-----	-----	18

Les figures 45 et 46 montrent la corrélation entre la concentration de poussières et la ténacité des matériaux. Ces données ont conduit (par courbe tendance) aux relations entre l'émission de poussières et la ténacité des matériaux :

$$P_M = A * T^\alpha \quad (16)$$

$P_M$  étant la concentration de poussière,  $T$  la ténacité des matériaux et  $A$  une fonction du matériau et  $\alpha$  une constante dépendant du matériau :

- Pour les familles des alliages de cuivre  $\alpha = -0.30$  et  $A = 0.225$
- Pour les familles des alliages d'aluminium  $\alpha = 0.45$  et  $A = 0.021$

D'après cette équation (16), nous pouvons conclure que la ténacité du matériau est proportionnelle à la concentration de poussière seulement pour les alliages d'aluminium; alors que cette influence est faible pour les alliages de cuivre. Dans le cas général, plus le matériau est fragile, moins il émet de poussière.

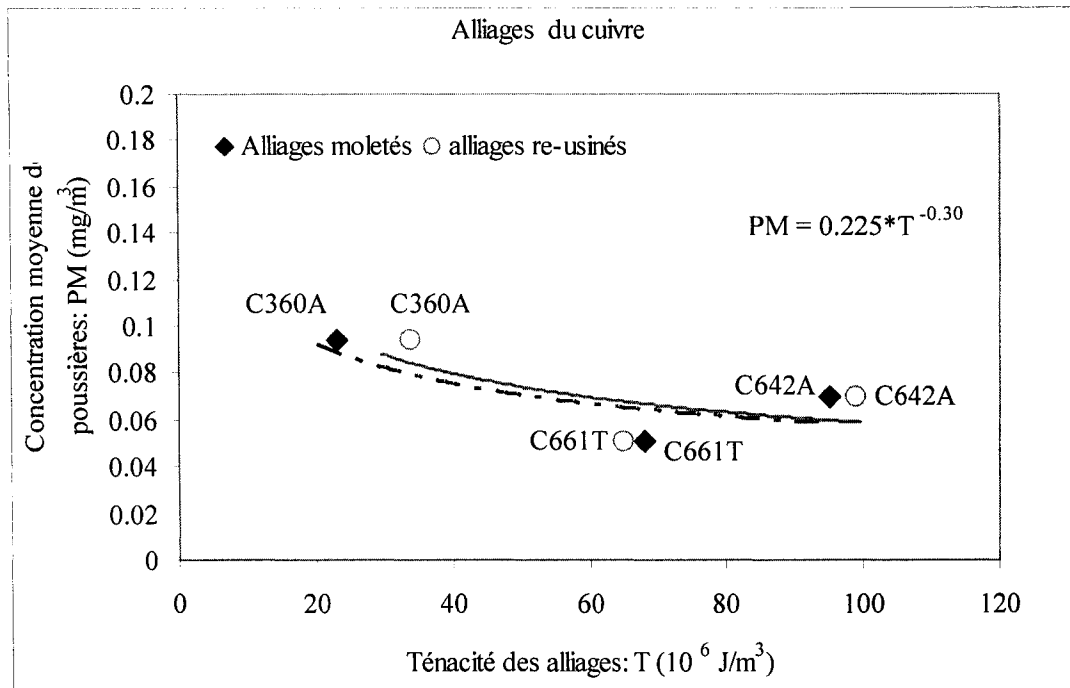


Figure 45 Concentration en fonction de la ténacité de cuivre

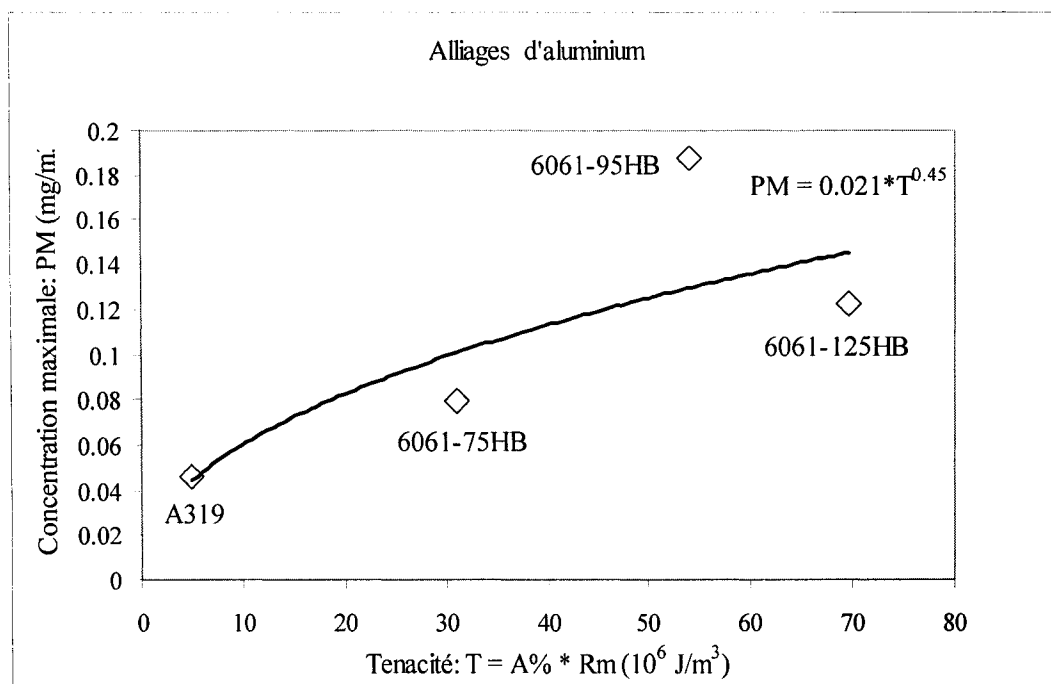


Figure 46 Concentration en fonction de la ténacité de l'aluminium)