

CHAPITRE 2

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction

Notre étude porte sur l'étude des émissions de poussières pendant l'usinage à sec des alliages d'aluminium et des alliages de cuivre. Nous appellerons poussières les particules de moins de $0,25\mu\text{m}$.

Le principal but de cette étude est de pouvoir préciser les causes d'émission de poussières dans l'usinage à sec. Nous désirons préciser les mécanismes d'émission de la poussière afin de pouvoir sélectionner le meilleur alliage. Pour arriver à ce résultat, des sous thèmes sont définis.

Nous étudierons l'influence de l'alliage sur l'émission de la poussière. Certains alliages sont-ils plus sensibles à l'émission de poussières? Nous avons choisi de comparer deux familles d'alliages qui sont proches dans leur structure cristallographique, mais dont les propriétés mécaniques sont différentes : Le cuivre et l'aluminium de corroyage (par opposition avec les alliages de fonderie) sont deux alliages à structure cubique à face centrée, possédant très peu d'impuretés mais qui présentent des mécanismes de durcissement très différents: le durcissement structural pour l'aluminium, la solution solide et l'écroutissage pour le cuivre. Ces modes de déformation différents entraînent des comportements différents dans la production de la poussière.

Nous évaluerons l'influence du traitement thermique de l'aluminium sur l'émission de poussières. Nous voulons vérifier s'il est possible de définir un traitement thermique qui minimise l'émission de poussières.

Afin d'étoffer le mécanisme d'émission de poussière, proposé des analyses micrographiques des alliages, des tests de dureté et d'écrasement (ténacité) seront utilisés

afin de comprendre le mécanisme d'initiation et de la propagation de fissures lors de formation du copeau. Ce dernier test sera proposé comme moyen simple de prédiction de l'émission de la poussière. On souhaite ainsi définir une nouvelle propriété des matériaux : la 'poussiérabilité', propriété que possède un matériau d'émettre de la poussière lors de l'usinage. Cette propriété devrait être indépendante du type d'usinage. Des essais seront réalisés en perçage et en fraisage afin de confirmer ou non le caractère intrinsèque de cette propriété.

2.2 Description de l'appareil de mesure de poussières

L'appareil de mesure de poussières est le "Dust Track" aérosol monitor Model 8520 qui est un photomètre à laser. Ce photomètre à laser mesure la quantité de poussières émises par diffraction de la lumière. À partir d'une calibration, la concentration de la poussière dans l'air est quantifiée. Quand une particule passe à travers le rayon laser une partie de la lumière est diffractée, une autre partie est absorbée par les particules. La quantité de lumière diffractée dépend des propriétés des particules.

Le dispositif de mesure aspire de l'air de l'enceinte à une vitesse de 1.7 litre d'air par minute, soit 0.028 l/s. Ce dispositif est mis en marche avant que l'usinage ne commence et est maintenu en fonctionnement jusqu'à ce que le niveau de poussière dans l'enceinte tombe à zéro.

Le « DustTrak » est fabriqué par TSI corporated. C'est un instrument à lecture directe de la quantité totale de poussières. Il détecte la lumière diffusée à 90 degrés par les particules situées dans un certain volume. Il est étalonné par le manufacturier avec des particules répondant à la norme ISO 12103-1, A1 (anciennement « Arizona Road Dust »). Cette poussière est utilisée en raison de son étendue granulométrique. D'après le manufacturier, l'étalonnage avec ce produit est représentatif de la plupart des aérosols ambiants rencontrés.

2.3 Procédure expérimentale du fraisage

La machine-outil utilisée est une fraiseuse à trois axes de marque Bridgeport, model INT 400.

La figure 6 schématise le dispositif dont nous nous sommes servis pour cette étude.

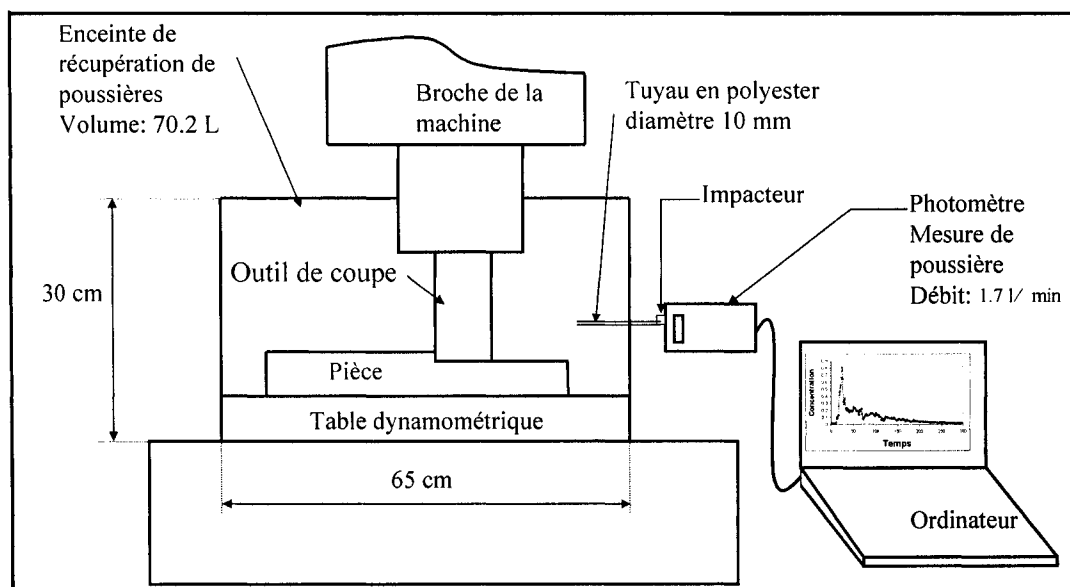


Figure 6 Montage expérimental pour l'étude des poussières produites lors du fraisage [55].

Le tableau I, résume les conditions de coupe testées, ces tests ont été effectués en faisant varier un paramètre à la fois.

Tableau I
Paramètres de coupe des essais de fraisage

| Vitesse de coupe (m/min) | Avance par dent (mm/dent) | Immersion de l'outil (%) | Profondeur de coupe (mm) |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 50 | 0.254 | 20 | 1 |
| 100 | 0.5 | 40 | 2 |
| 150 | 0.75 | 60 | 4 |
| 200 | 1 | 80 | 6.35 |

Une enceinte close en plexiglas est construite autour de la machine pour que les poussières générées soient confinées. Un tuyau en polyester de diamètre 10mm et de longueur 400 mm permet de prélever l'air chargé de poussières. Cet air passe à travers un "impacteur" qui filtre les particules de poussières. Ce filtre permet le passage des poussières dont la taille est inférieure à 2.5 μ m. L'air ainsi filtré entre dans le dispositif de mesure de la concentration de particules (photomètre à laser) qui est relié à un ordinateur qui assure l'acquisition des données. Ce dispositif permet d'évaluer la variation de la concentration de l'air de poussières en fonction du temps (figure 6). Le résultat est exprimé en mg de poussière par m³ d'air filtré en fonction du temps d'acquisition.

Procédure expérimentale du perçage

Le perçage a été réalisé pour les basses vitesses de coupe, jusqu'à 1000 RPM, sur une perceuse à colonne équipée d'une boîte en plexiglas. Un système d'acquisition de force Kistler, fait à l'aide d'une table dynamométrique, permet l'acquisition de la force normale en N.

Les tests de perçage à grande vitesse ont été exécutés sur une machine à commande numérique à cinq axes de marque Hitachi Seiki Type VS50/60.

- Vitesse de rotation : 12000 RPM.
- Diamètre du foret 10mm en HSS, deux lèvres, non revêtus, angle de pointe de 108°. Ces outils ont été choisis à cause de leur grande utilisation et de leur grande reproductibilité de fabrication.

Tableau II

Paramètres de coupe des essais de perçage

| Vitesse de coupe (m/min) | Avance par dent (mm/tour) |
|--------------------------|---------------------------|
| 28 | 0.11 |
| 45 | 0.16 |
| 226 | 0.18 |
| 150 | 0.21 |
| 250 | ===== |
| 377 | ===== |

* La profondeur de coupe est de 10mm pour tous les essais

Deux alliages d'aluminium ont été étudiés: les 6061 alliages de corroyage et le A 319 alliage de fonderie.

Les types d'alliages de cuivre testés sont: C360A, C642A, C661T, C694

Le tableau III, résume les compositions des alliages testés.

Tableau III
Composition des alliages d'aluminium et de cuivre

| Alliages | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Al | Prix \$US/lb |
|------------|----------|---------|-----------|------------|----------|------------|----------|-----------|--------------|
| 6061-95HB* | 0.40-0.8 | 0.7 max | 0.15-0.40 | 0.15 max | 0.8-1.2 | 0.25 max | 0.15 max | 95.8-98.6 | ==== |
| A319** | 5.5-6.5 | 1.0 max | 3.0-4.0 | 0.50 max | 0.10 max | 1.0 max | 0.25 max | 85.8-91.5 | ==== |
| C360A | ==== | 0.24 | 60.3 | ==== | ==== | bal | ==== | == | 1.50 |
| C661A | 2.9 | 0.03 | 94.8 | 0.6 | ==== | 0.87 | ==== | == | 3.58 |
| C661T | 3.07 | 0.06 | 96 | 0.87 | ==== | 0.19 | ==== | == | ==== |
| C642A | 1.8 | 0.05 | bal | 0.05 | ==== | 0.05 | ==== | 6.8 | 3.00 |
| C642C | 2.21 | 0.016 | 91.4 | Inf. 0.003 | ==== | Inf. 0.005 | ==== | 6.9 | 0.5 |
| C694A | ==== | 0.06 | 80.5 | 3.6 | ==== | bal | ==== | == | 2.98 |

* Metals Handbook, Vol.2, 9th éd, P115

** Metals Handbook, Vol.2, 9th éd., P.159

Compositions fournies par les fabricants : A= Ansonia, T= Thompson, C= Chine

Le 6061-95HB contient de 0.04 -0.35Cr et le A319 contient au maximum 0.35Ni. L'alliage C661T contient aussi des traces de l'arsenic (inférieur à 0.055).

Deux traitements thermiques ont été réalisés au laboratoire correspondant aux traitements du 6061-75HB et 6061-125HB à partir du traitement du 6061-95HB tel que reçu. Les échantillons ont été de nouveau homogénéisés (traitement de mise en solution), trempés et vieillis à différentes températures. Les conditions de ce traitement thermique ont été tirées de [52]

La dureté permet de mesurer l'efficacité de ce traitement thermique : 6061-75HB, 6061-125HB, 6061-95HB. Les conditions de ces traitements sont présentées dans le tableau IV.

Tableau IV
Paramètres du traitement thermique du 6061

| Alliage | Température de maintien (°C) | refroidissement | vieillissement |
|------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 6061-125HB | 530 | trempe à l'eau froide | Continue à température ambiante |
| 6061-75HB | 430 | air (20 °C) | |

Le temps de maintien est de 2h30 pour tous les traitements.

Afin de souligner l'influence du procédé de fabrication, deux alliages de cuivre semblables ont été comparés. L'un provenait d'un fournisseur nord américain, Ansonia,

l'autre a été élaboré en Chine, à un coût moindre. Les microstructures, bien que la composition soit nominale la même, sont très différentes. L'alliage fabriqué en Chine est un brut de fonderie, avec beaucoup de défauts de fabrication, dont beaucoup d'impuretés, de porosités et d'hétérogénéités.

Des recuits ont été exécutés au laboratoire afin de vérifier leur effet sur la diminution des contraintes résiduelles des alliages de cuivre reçus. Le tableau V, résume les températures utilisées. La dureté sera ensuite pratiquée pour mesurer l'efficacité de ce traitement thermique.

Tableau V

Procédure de recuit des alliages de cuivre

| Alliages | Températures (°C) |
|----------|-------------------|
| C360 A | 450 |
| C694 A | 450 |
| C642 A | 475 |
| C661 A | 480 |

Les échantillons ont été maintenus une demi-heure aux températures indiquées, le refroidissement a été lent, à l'air libre. Les conditions de ce traitement thermique ont été tirées de M1295-4, Technique de l'Ingénieur [53].

Une analyse ultérieure (chapitre 4) a montré que tous les échantillons avaient reçu après extrusion un traitement thermique qui a été réalisé par le fabricant. Nous avons démontré qu'un traitement thermique de recuit supplémentaire réalisé au laboratoire ne change pas

les propriétés, ce qui signifie que les fabricants ont appliqué un traitement de recuit relativement complet.

L'analyse de la microstructure a été réalisée afin de vérifier l'état de l'alliage. Les micrographies sont présentées dans les figures 7 à 20.

2.4 Microstructures des alliages

2.4.1 Les alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium qui seront testés (le 6061 et ses composés) sont des alliages de corroyage et l'alliage de fonderie (le A319).

Le 6061

Cet alliage présente une microstructure classique des alliages à durcissement structural. Les joints de grains ne sont pas visibles sur la micrographie, ce qui est souvent le cas sur ce type d'alliages monophasés. Les précipités de Mg_2Si sont uniformément répartis.

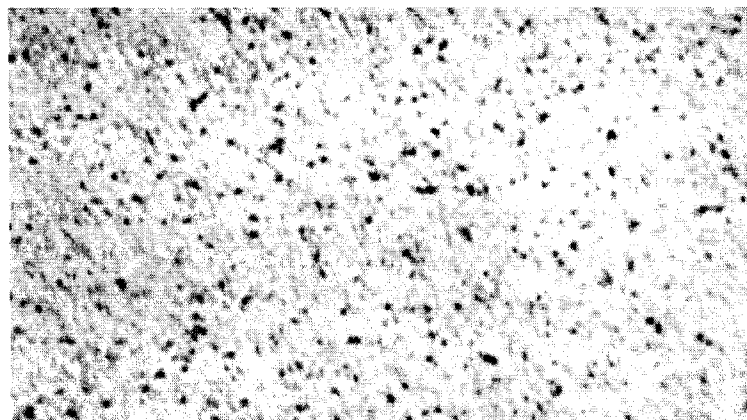


Figure 7 Microstructure du 6061-95HB (100X)

Le A319

On peut observer la structure habituelle d'un alliage de fonderie, avec la présence de dendrites et d'eutectique inter dendritique (Figure 8).

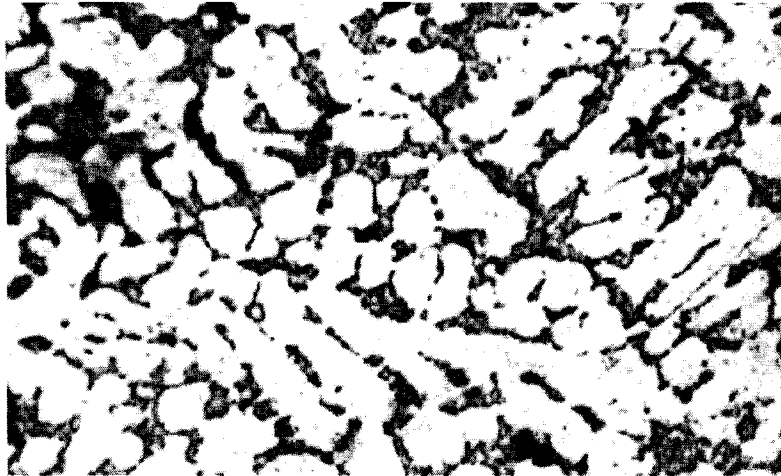


Figure 8 Microstructure du A319 (100X)

Quelques microporosités ont été trouvées. Ces porosités sont typiques des alliages de fonderie de ce type. Elles expliquent en grande partie la faible ductilité de ces alliages. La taille des bras dendritiques est de 50 μ m ou moins.

2.4.2 Les alliages de cuivre

Le C360A

C'est un alliage qui possède un peu de phase bêta. Celle-ci est dispersée dans le sens de la déformation. Le diagramme Cu-Zn ([Annexe 3](#)) montre qu'au-delà de 30% de zinc dans le cuivre la phase β apparaît progressivement et remplace totalement la phase α au fur et à mesure de l'augmentation de la concentration du zinc. En dessous de 30% de zinc, l'alliage est monophasé. C'est un alliage très utilisé, pour ses propriétés mécaniques et de mise en forme. Des bandes de plomb sont aussi très visibles. Le

plomb facilite l'usinage et l'évacuation des copeaux mais il favorise aussi l'initiation et la propagation des fissures. Il est donc préférable d'éviter les alliages avec des répartitions non homogènes de plomb. La structure de bandes est certainement une des plus mauvaises de ce point de vue des fissures (Figure 9).

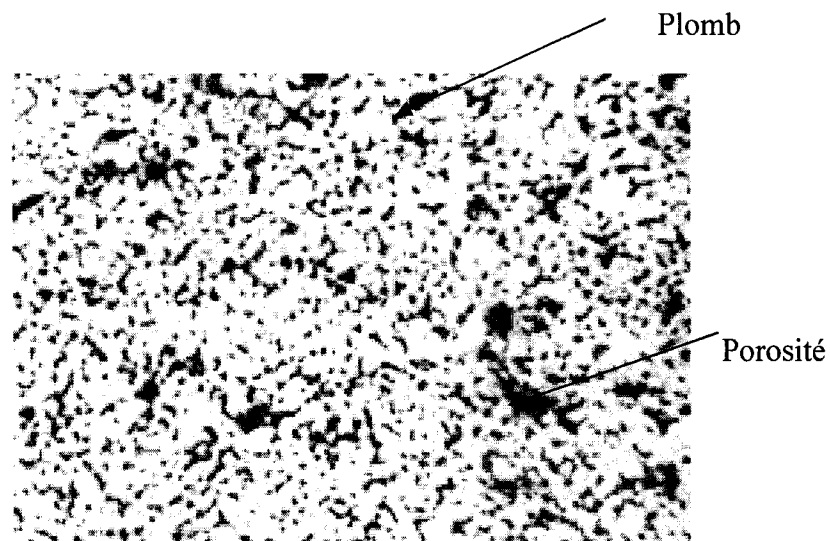


Figure 9 Microstructure en coupe transversale du C360 A sans TT (100X)

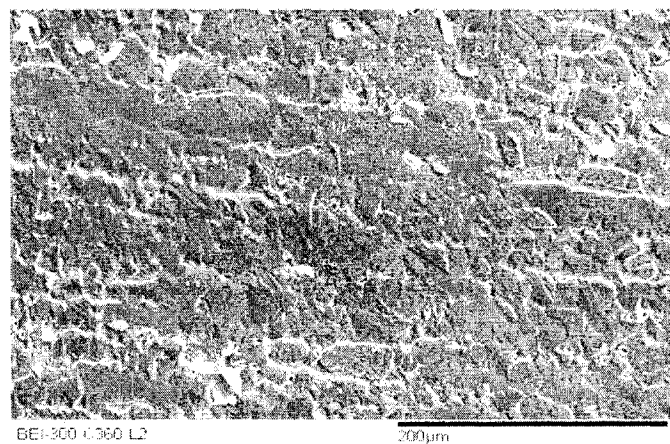


Figure 10 Microstructure en coupe longitudinale sans TT du C360 A

Le C694

C'est un laiton monophasé. Il présente aussi quelques bandes de plomb et un mélange de grains équiaxes et de grains allongés, surtout dans la direction dite 'longitudinale'. La taille des grains (mesure transversale) est de 20-30 μ m. La présence de ces deux types de grains est le résultat d'un traitement thermique de recristallisation non terminée ou d'une inhomogénéité dans la déformation, ce qui semble le plus probable car certaines régions sont recristallisées et d'autres pas. La structure initiale de l'extrusion n'est probablement pas complètement régulière et donc l'effet du traitement thermique n'est pas homogène. La structure initiale due à l'extrusion n'est pas complètement effacée (Figure 11).

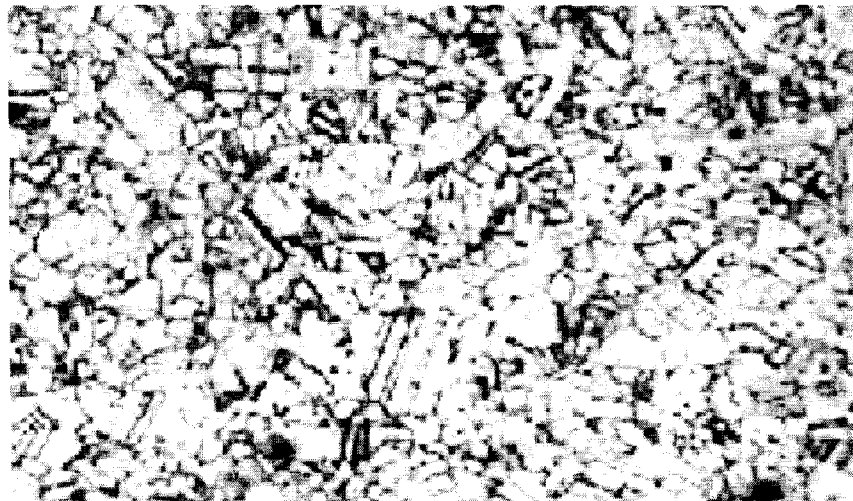


Figure 11 Microstructure en coupe transversale du C694 sans TT (100X)

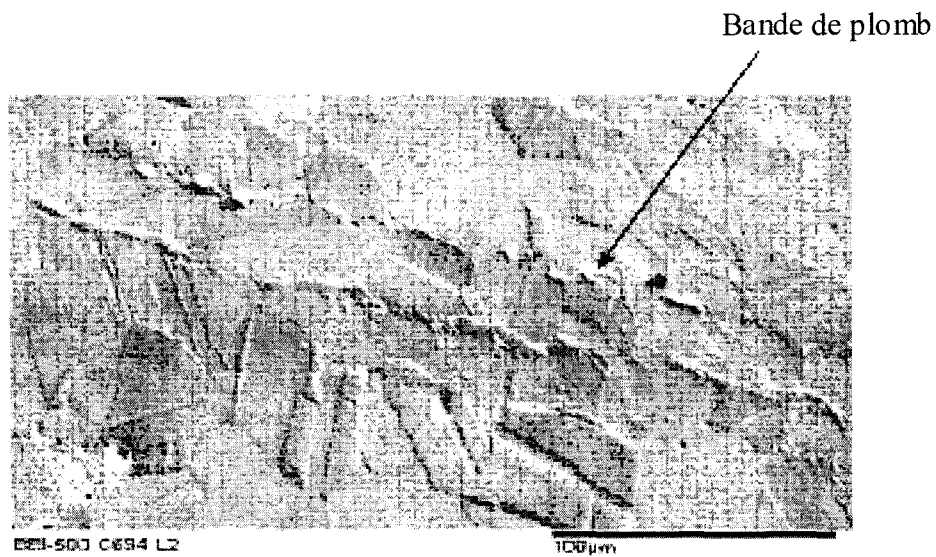


Figure 12 Microstructure du C694 en coupe longitudinale sans TT

Remarquons encore la présence de bandes de plomb presque continues, ce qui est fort défavorable pour la ténacité du matériau.

Le C642A

L'alliage est monophasé. Il présente une microstructure propre (sans impureté) avec des bandes recristallisées où la croissance secondaire prédomine. Le diamètre des grains en mesure transversale est d'environ $30\mu\text{m}$ et $60\mu\text{m}$ en mesure longitudinale. (Figure 13).

On peut observer des bandes non recristallisées ou faiblement recristallisées, à gros grains. Cette microstructure hétérogène n'est pas favorable en ténacité, en fatigue, en corrosion.



Figure 13 Microstructure en coupe transversale du C642 A sans TT (100X)



BEI-160 C642 L12

400µm

Figure 14 Microstructure en coupe longitudinale du C642A sans TT

Le C642 C

Pour des fins de comparaison des alliages fabriqués en Chine et des alliages fabriqués sur le continent Nord Américain ont été testés. Ils possèdent une composition nominale identique (Figure 15).

Le C642C, fabriqué en Chine, présente une microstructure à gros grains allongés irrégulière, monophasée, avec beaucoup d'impuretés telles que des précipités ou des inclusions. Il possède les caractéristiques des alliages de fonderie. Le refroidissement après la coulée a été lent, la microstructure est grossière.

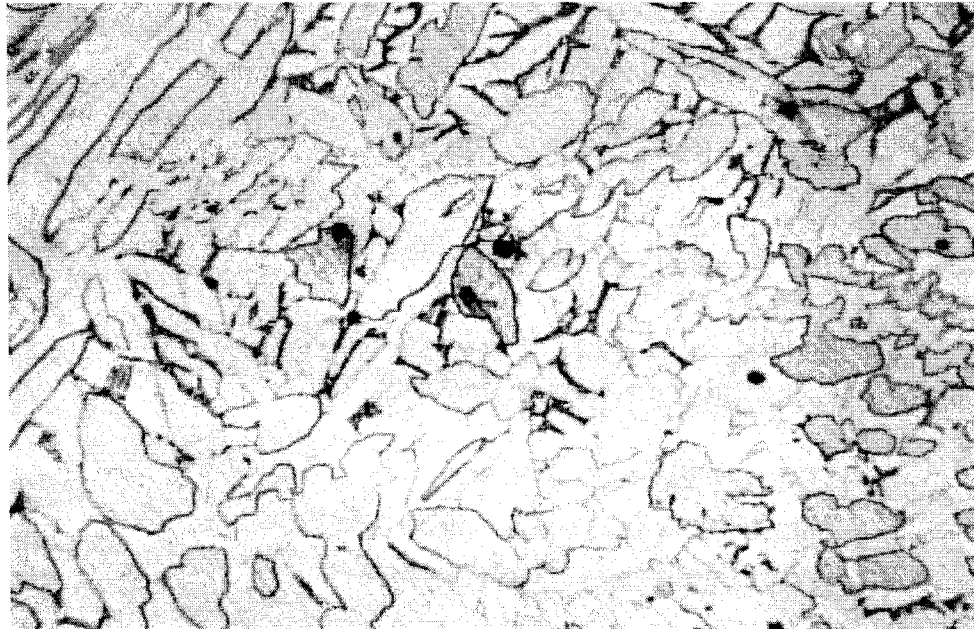


Figure 15 Microstructure en coupe transversale du C642 C sans TT (200X)



Figure 16 Microstructure en coupe longitudinale du C642 C sans TT (200X)

Cette microstructure est évidemment fort différente de celle de son concurrent nord américain, le C642A, qui présente une microstructure plus homogène où la structure de fonderie a été effacée par l'extrusion qui agit pendant ou après la solidification.

Le C661A

Cet alliage présente une concentration plus élevée de bandes de plomb que celle constatée sur son concurrent le C661T. La microstructure montre une recrystallisation non complète avec des grains disproportionnés (Figure 17).



Figure 17 Microstructure en coupe longitudinale C661A avant TT (100X)



Figure 18 Microstructure en coupe transversale C661A après TT (100X)

Le C661T

Cet alliage présente une répartition inhomogène de plomb. Il paraît plus propre que son concurrent le C661A. La microstructure montre une recristallisation complète ses grains sont équiaxes et homogènes (figure 19).



Figure 19 Microstructure en coupe transversale du C661T sans TT (100X)

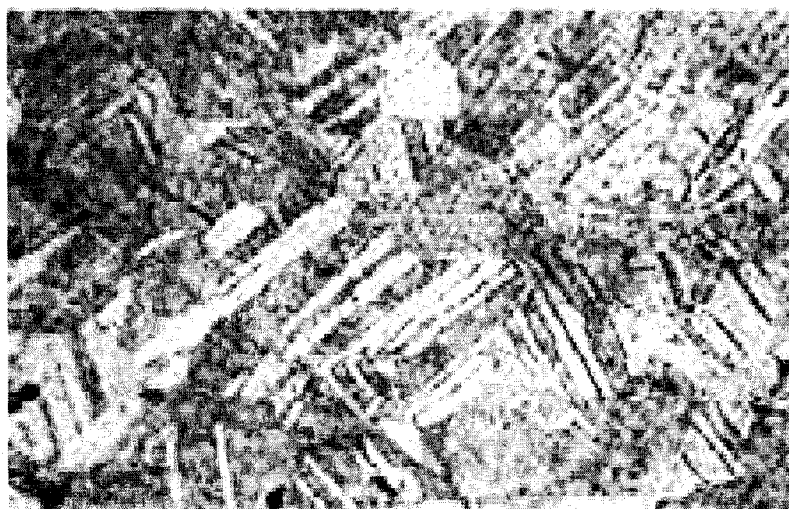


Figure 20 Microstructure en coupe longitudinale du C661T sans TT (100X)

2.5 Propriétés mécaniques des alliages

Tableau VI

Propriétés des alliages

| Alliages | Allongement à la rupture (A%) | R _m (MPa) | Ténacité R _m *A% (J/m ³).10 ⁶ |
|--------------|-------------------------------|----------------------|--|
| 6061-95HB * | 17 | 410 | 69,7 |
| 6061-125HB * | 22 | 245 | 54 |
| 6061-75HB * | 25 | 125 | 31 |
| A319 ** | Min 2 | Min 234 | 5 |
| C360A | 21 | 60 | 12,6 |
| C694A | 41 | 81 | 33,21 |
| C642A | 24 | 100 | 24 |
| C642C | 4 | 30 | 1,2 |
| C661T | 21-22 | 82 | 18,04 |

* ``Des matériaux`` [année 2000, p. 519, tableau 11.4]. La dureté des trois premiers alliages a été mesurée au laboratoire.

** Materials Handbook [vol.2, 9th éd. P.116].

Les valeurs de R_m et A% ont été fournies par le fabricant (A= Ansonia) et (C=Chine)

R_m est la résistance mécanique et la ténacité la résistance à la propagation d'une fissure.

Le tableau VII résume les résultats des tests de dureté.

Tableau VII
Duretés et allongement à la rupture [28]

| Alliages | Dureté (HB) r ASM vol 1. P.949 | Dureté (HRB) Mesurée ETS | Dureté mesurée HRB Ansonia |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 6061-a | 125 | | |
| 6061-b | 95 | | |
| 6061-c | 75 | | |
| A319 | 56 | | |
| C360A | | 93,2 | 92-94 |
| C694 | | 81,3 | |
| C642A | | 83 | 69,7 |
| C642C | | 82 | |
| C661A | | 78,7 | |
| C661T | | 50 | *57,5 |

- testé par X-PER-X

Avec a, b, c les dénominations des alliages d'aluminium selon leur dureté. Six mesures ont été réalisées au laboratoire pour chaque condition, l'erreur de mesure est de +/-0.2 HRB.

2.6 Tests d'écrasement

Ce test a été réalisé pour tenter de prédire la poussiérabilité par un test simple de ténacité.

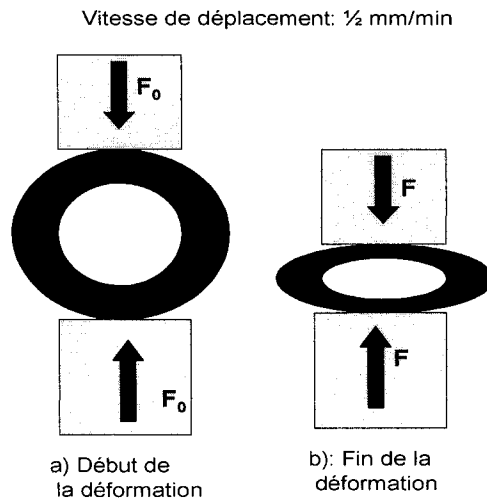


Figure 21 Dispositif du test d'écrasement

Nous avons réalisé des tests qui permettraient de prévoir la poussiérabilité. Rappelons que nous avons désigné ainsi la propriété intrinsèque que possède un matériau, à émettre de la poussière pendant l'usinage.

Donc, pour pouvoir relier la poussiérabilité à la ténacité, des tests de compression ont été réalisés à l'aide d'une machine de compression programmable (annexe1). Le principe est schématisé sur la figure 21. Ces essais consistent à soumettre des échantillons de forme cylindrique à deux forces axiales opposées en les plaçant entre les plateaux d'une presse programmable. Cette machine (MTS) se compose de deux plateaux pour tenir l'éprouvette, l'un fixe et l'autre mobile, d'un dispositif hydraulique, d'un dynamomètre et d'un extensomètre relié à un enregistreur. La charge peut varier de quelques newtons, le déplacement se fait à une vitesse constante de l'ordre de quelques millimètres par minute. Les tests ont été exécutés sur trois alliages : le C642 A traité thermiquement au laboratoire, le C661T non traité et le C360A non traité avec et sans moletage, avec une

vitesse de $V_d = 0.5$ mm/min. Les échantillons ont été testés dans la condition de réception ('tel que reçu'). Les forces locales ont été mesurées en instrumentant des échantillons cylindriques. Les détails des calculs de la contrainte tangentielle sont donnés au chapitre 3.

Nous voulons définir un test qui se rapproche des conditions d'émission de poussières. Rappelons encore que nous insisterons sur ce point plus loin (chapitre 4). Rappelons que le mécanisme élémentaire de production de poussière ce fait par la création d'une fissure et le frottement des deux lèvres. Les mesures de ténacité classiques (éprouvette, ASTM E 399) ne sont pas adaptées puisque la fissure se propage en mode I et que l'émission de poussières est proche du mode II (Figure 22).

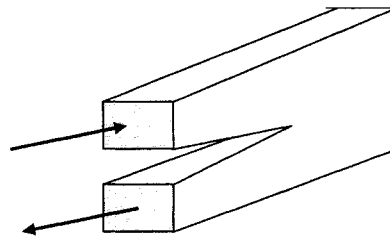


Figure 22 Propagation d'une fissure émettrice de poussières

Nous avons donc repris un essai simple, que nous avons nommé ténacité par écrasement (normalisé ASTM) qui nous a semblé plus pratique pour caractériser des bagues industrielles et plus proche des conditions d'émission de poussières pendant l'usinage. De plus ce test peut aussi servir à quantifier l'initiation et la propagation pour les essais de classification des alliages.

Soulignons aussi que ce test initie la fissure en mode I et que la propagation s'effectue en mode mixte. En effet, les conditions expérimentales ne sont pas assez précises pour que la propagation se fasse toujours en mode I. De plus la striction latérale n'est pas négligeable et donc favorise sur les côtés le mode II.

Les tests ont été dupliqués sur deux échantillons. De plus pour quantifier l'effet de concentrateur de contrainte deux échantillons moletés et deux échantillons non moletés ont été testés. Cette opération de moletage est mécaniquement assez sévère.

2.7 Précision des mesures

La reproductibilité de la mesure est estimée à partir de l'écart-type e :

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Avec

x_i – I^{ème} valeur obtenue sur une série de n mesures

\bar{x} : valeur moyenne sur une série de n mesures

n : nombre de mesures

Pour chacune de nos séries de données, une analyse statistique a été faite pour obtenir l'écart-type et l'erreur-type. Par exemple, pour les données de concentration des poussières lors du perçage des alliages de cuivre, les essais ont été répétés 10 fois. L'analyse statistique nous a donné une erreur type de 0.007 mg/m^3 .

L'erreur -type est fourni au début de chaque série des résultats dans le présent mémoire.