

Contraintes Résiduelles et Fatigue Des Alliages D'Aluminium Grenaillées

*A. Niku-Lari, CETIM/Senlis-France
D. Gillereau, Aerospatiale/Toulouse-France*

1 - INTRODUCTION

L'amélioration en fatigue due au grenailage est souvent mise à profit dans la conception des structures aéronautiques. Les nombreux essais effectués au cours de ces dernières années nous ont montré que si le grenailage apportait dans tous les cas une amélioration, celle-ci pourrait être très variable suivant le type de structure et de sollicitation considéré. Cette observation nous a conduit, pour chaque cas structural important où l'emploi du grenailage était envisagé, à effectuer des essais en fatigue sur des éprouvettes aussi représentatives que possible de l'élément de structure, ce qui conduit en général à des essais assez complexes. Ces essais ont permis la détermination de paramètres optimaux pour des applications sur des structures d'avion. Cette démarche étant assez lourde, nous avons pensé qu'il serait intéressant de déterminer la valeur et la répartition des contraintes résiduelles induites par le grenailage et de tenter de corréliser ces notions aux résultats de fatigue.

2 - MATERIAUX ET CONDITIONS DE GRENAILLAGE ETUDIÉS

Les matériaux étudiés sont classiques des structures aéronautiques. Leurs principales caractéristiques sont rappelées dans le tableau 1 ci-dessous :

| | UTS R mini MPa (1) | YS Ro,2 mini MPa (1) | e A% mini (1) |
|--------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| 2024 T 351 | 420 | 300 | 8 |
| 7075 T 7351 | 460 | 370 | 6 |
| 7010 T 73651 | 490 | 430 | 6 |

TABEAU 1

(1) caractéristiques de tôles e = 50 mm

Différents types de grenailages, applicables à des épaisseurs de pièces différentes ont été étudiés. Les principales variations concernent :

- la nature et les dimensions des billes,
- le temps de grenailage,
- l'intensité du grenailage

Le tableau 2 ci-dessous résume les conditions utilisées :

CONDITIONS DE GRENAILLAGE

| Type de grenailage | Nature des billes | Ø des billes (mm) | Flèche ALMEN (mm) | Temps de grenailage(1) | Rugosité obtenue(2) | |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|---------------------|---------|
| | | | | | Ra (µm) | Rt (µm) |
| G1 | acier | 0,6 | 0,20 / 0,24 A2 | 2 T _{R100} | 5,2 | 25,3 |
| G2 | acier | 0,6 | 0,26 / 0,31 A2 | 2 T _{R100} | 6,3 | 30,6 |
| G3 | acier | 0,6 | 0,20 / 0,24 A2 | 8 T _{R100} | 4,8 | 25,1 |
| G4 | verre | 0,5 | 0,15 / 0,20 A2 | 2 T _{R100} | 2,9 | 13,7 |
| G5 | verre | 0,3 | 0,16 / 0,20 N2 | 2 T _{R100} | 1,4 | 6,1 |
| G6 | verre | 0,3 | 0,26 / 0,32 N2 | 2 T _{R100} | 1,7 | 8,1 |
| G7 | verre | 0,3 | 0,13 / 0,16 A2 | 2 T _{R100} | 2,5 | 10,8 |
| S1 | alumine | 0,150 - 0,180 | 0,16 / 0,20 N2 | 2 T _{R100} | | |

(1) T_{R100} = temps de recouvrement à 100% d'une éprouvette en alliage d'aluminium

(2) Les rugosités des pièces avant grenailage sont Ra = 0,8 Rt = 3,8

TABEAU 2

3 - METHODE DE MESURE DES CONTRAINTES RESIDUELLES ET DE LA PROFONDEUR DE METAL PLASTIFIE

Les mesures de contraintes résiduelles ont été réalisées par la méthode de "la flèche". Cette méthode permet à la fois, de déterminer la profondeur de métal plastifié que l'on mesure sur des éprouvettes de faible épaisseur et de mesurer la répartition des contraintes résiduelles dans une pièce d'épaisseur quelconque à partir des valeurs relevées sur des éprouvettes minces [1], [2].

La méthode développée au CETIM est une méthode de mesure par enlèvement de couches successives sur pièces planes. Le principe en est simple : une pièce plane qui contient des contraintes résiduelles se déforme de manière à maintenir l'équilibre statique des moments et des forces internes. Sur une éprouvette parallélépipédique de faible épaisseur, cette déformation est représentée par la flèche visible que prend l'éprouvette en absence de tout effort extérieur. Cette flèche f est, bien sûr, fonction de la nature et de la grandeur des contraintes résiduelles en cause, dont la répartition dans l'épaisseur du matériau peut être caractérisée par une fonction $\sigma(e)$, e étant la cote de la couche considérée par rapport à la

surface de la pièce (figure 1).

Si, par usinage chimique, on enlève progressivement des couches de matériau dans lesquelles existaient des contraintes résiduelles, on bouleverse du même coup l'équilibre des efforts et moments interne. Pour rétablir cet équilibre, la pièce devra donc se déformer. La variation de flèche df produite par l'enlèvement d'une couche d'épaisseur de peut être reliée à la contrainte superficielle $\sigma(e)$ existant dans la couche enlevée par la relation :

$$\sigma_e(e) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E e^2}{l^2} \cdot \frac{df}{de}$$

Avant usinage chimique, l'éprouvette d'épaisseur H présentait une flèche f_H (fig. 2). Lorsque l'éprouvette est usinée jusqu'à la couche correspondant à une épaisseur de l'éprouvette e , la flèche a une valeur f_e . De façon générale, elle est donc représentée par une fonction $f(e)$ dont on peut relever la valeur point par point après chaque enlèvement de couche à l'aide d'un simple comparateur.

Un calcul classique permet alors de relier cette fonction $f(e)$ à la valeur des contraintes résiduelles $\sigma(e)$ qui existaient dans la pièce avant enlèvement des couches :

$$\sigma(e) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E e^2}{l^2} \frac{df}{de} + \frac{8 E e}{l} (f_H - f_e) + \frac{8 E}{3 l} \int_e^H e' df \quad (2)$$

Pour tenir compte du fait que l'état de contrainte introduit par grenail-
lage est uniforme ($\sigma_1 = \sigma_2$) il est nécessaire de multiplier la relation
(2) par un facteur $1/(1 - \nu)$ étant le coefficient de Poisson du matériau.
Le calcul des contraintes résiduelles est effectué à l'aide de la rela-
tion (2) par ordinateur après lissage de la courbe de variation de flèche
par la méthode des moindres carrés.

Un programme de calcul supplémentaire a été mis au point, qui permet le calcul de la répartition de contraintes résiduelles dans une pièce épaisse à partir de la mesure effectuée sur une pièce mince. Son intérêt est évident car il rend possible la détermination de l'évolution des contraintes résiduelles dans une pièce massive ou très épaisse à partir d'une mesure très précise sur une pièce mince ayant subi le même traitement de précontrainte. Des précautions sont, bien sûr à prendre pour que l'éprouvette mince soit parfaitement représentative des phénomènes qui se déroulent dans les pièces massives lors de la création des contraintes résiduelles. La figure 2b donne des résultats obtenus dans le cas d'une éprouvette grenillée. La mesure a été effectuée sur une éprouvette de 1,3 mm d'épaisseur et l'ordinateur a effectué le tracé des contraintes résiduelles.

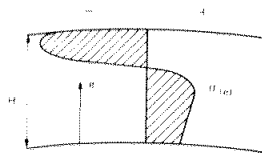
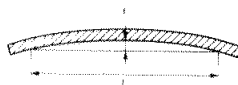


Fig. 1



Pour comparer la répartition des contraintes résiduelles introduites par différentes conditions de grenailage, nous avons calculé dans tous les cas de figures ces contraintes pour une pièce d'épaisseur 20 mm.

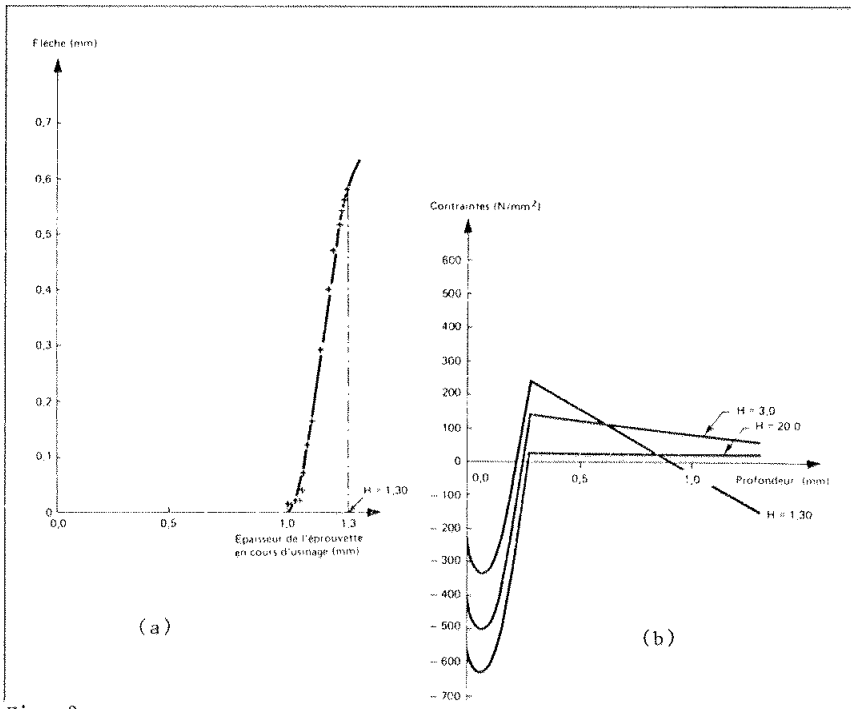


Fig. 2 :

(a) Lissage de la courbe de variation de flèche au cours de l'usinage chimique sur éprouvette mince (1,3 mm)

(b) Tracé de la répartition des contraintes résiduelles pour différentes épaisseurs de pièces grenillées dans les mêmes conditions que l'éprouvette de mesure.

4 - RESULTATS DES MESURES

4.1. Profondeur de métal plastifié (pp)

La profondeur de métal plastifié par grenailage correspond à l'épaisseur de couche de métal enlevée sur l'éprouvette pour obtenir une flèche longitudinale nulle.

Le tableau 3 résume les résultats de profondeur de métal plastifié pour différents types de grenailage.

| Matériau | 2024 T 351 | | | 7010 T73651 | | 7075 T7351 | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------|------|-------------|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | S1 | | G5 | G1 | | G1 et G3 | | | G2 | | G4 | | G5 | | G6 | | G7 | |
| Temps de grenailage(1) | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 8 | 1 | 2 | 2 | 3,5 | 1,5 | 2 | 2 | 6 | 2 | 3,5 |
| Contrainte résiduelle maximale(2) MPa | 295 | 333 | 353 | 367 | 333 | 330 | 345 | 367 | 330 | 333 | 307 | 323 | 273 | 347 | 333 | 313 | 313 | 320 |
| Profondeur plastifiée(mm) | 0,045 | 0,11 | 0,12 | 0,31 | 0,36 | 0,29 | 0,30 | 0,22 | 0,30 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,14 | 0,08 | 0,17 | 0,13 | 0,15 | 0,14 |

(1) Exprimé en nombre de T_{R100} (T_{R100} = temps de recouvrement à 100% d'une éprouvette en alliage d'aluminium)

(2) Déterminée pour une épaisseur de 20 mm

TABLEAU 3 : contraintes résiduelles et profondeurs plastifiées obtenues pour différents types de traitements.

La figure 3 montre la variation de la profondeur plastifiée en fonction de la flèche Almen. On constate que :

- la profondeur de métal plastifié augmente avec l'intensité de grenailage
 - c'est le grenailage effectué avec l'intensité maximale qui provoque la plus grande profondeur plastifiée (0,35 pour alliage 7075, condition G2),
 - la profondeur plastifiée obtenue par un grenailage avec de l'alumine est la plus faible de l'ordre de 0,045 mm
- Un grenailage avec des billes de verre de gros diamètre produit une PP plus élevée que le grenailage de même intensité avec un ϕ de 0,3 mm
- un grenailage relativement intense effectué avec des billes de verre de faible diamètre (ϕ 0,3 mm) ne semble pas produire une profondeur plastifiée aussi importante qu'un grenailage de même intensité effectué avec des billes de ϕ supérieur, le rôle du diamètre des billes semble donc prévaloir sur ceux de la vitesse de projection
 - la plage de dispersion de la courbe profondeur plastifiée/intensité Almen est relativement étroite.

4.2 - Niveau des contraintes maximales de compression

Le niveau des contraintes maximales introduites par grenailage ne semble pas avoir de relation bien établie avec les conditions de grenailage (tableau 3). Nous pensons que la valeur de la contrainte maximale est une caractéristique intrinsèque du matériau, comme c'est le cas pour les aciers [2] [3].

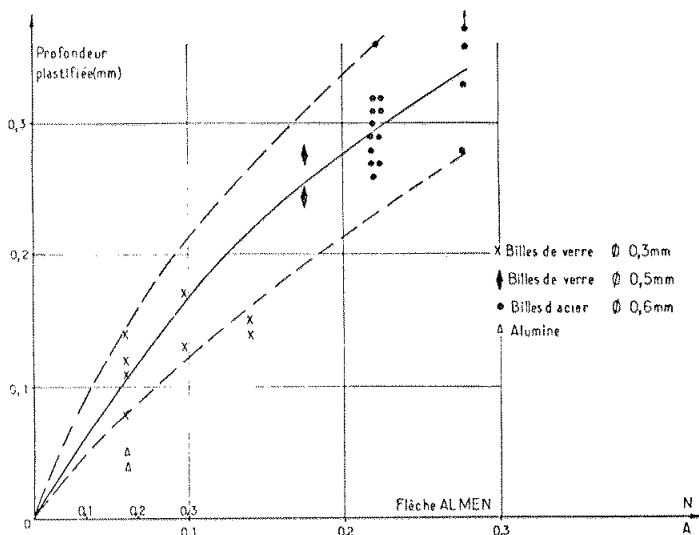


Figure 3 : évolution de la profondeur plastifiée en fonction de la flèche Almen.

4.3 - Répartition des contraintes résiduelles

Nous avons vu au § 4.2 que le niveau de la contrainte résiduelle maximale est du même ordre de grandeur quelles que soient les conditions de grenailage. Ce paramètre ne peut donc expliquer les différences de comportement en fatigue constatées (voir § 5). Nous pensons que plusieurs paramètres peuvent influencer conjointement l'efficacité d'un traitement de grenailage quant à l'amélioration de la durée de vie :

- la profondeur de métal plastifié
- niveau de la contrainte résiduelle qui dans ce cas varie très peu
- l'allure de la répartition des contraintes résiduelles (gradient des contraintes),
- la nature du matériau grenailé qui conditionne le degré de relaxation de ces contraintes pendant la fatigue.

Les figures 4 à 9 présentent quelques exemples montrant l'influence de différents paramètres de grenailage sur la répartition des contraintes résiduelles.

On constate que dans le cas des essais effectués :

- un doublement du temps de grenailage à partir du temps de recouvrement à 100 % augmente légèrement la profondeur de métal plastifié et le niveau de contrainte résiduelle maximale sans modifier la contrainte en surface (voir figure 4).

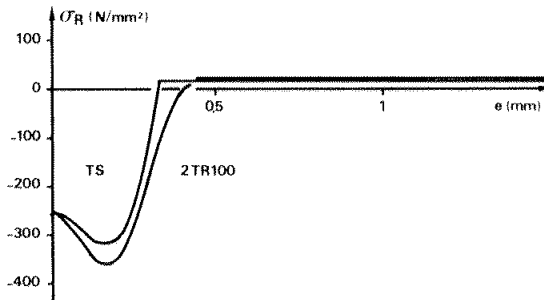


FIGURE 4 : influence du temps de grenailage. Conditions de grenailage : G2. Alliage d'aluminium 7075

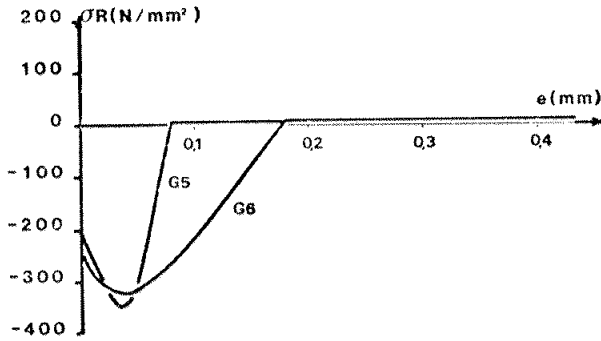


FIGURE 5 : influence des conditions de grenailage. Alliage d'aluminium 7075

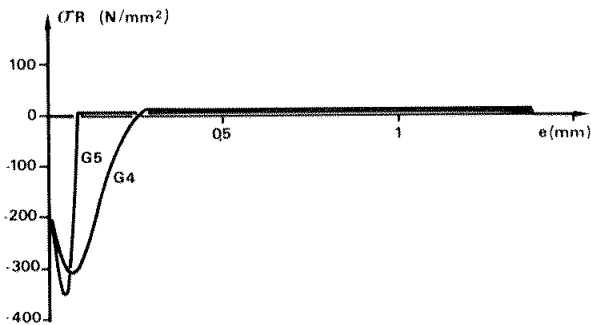


FIGURE 6 : influence des conditions de grenailage. Alliage d'aluminium 7075.

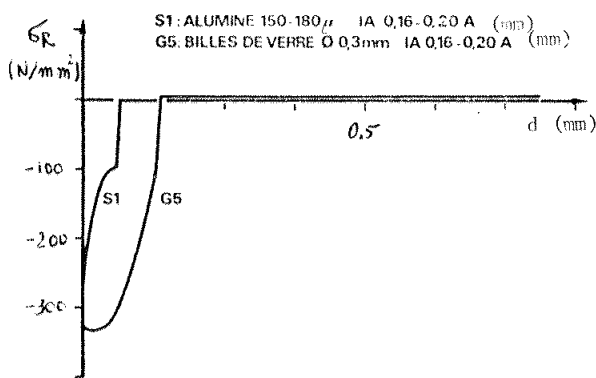


FIGURE 7 : influence de la nature des grenailles. Alliage d'aluminium 2024

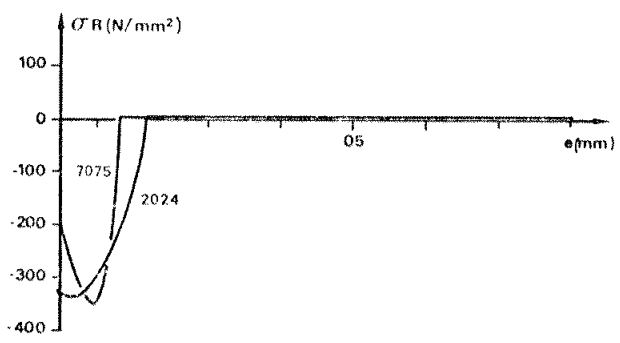


FIGURE 8 : influence de la nature de l'alliage, grenailage de faible intensité G5. Conditions de grenailage G5

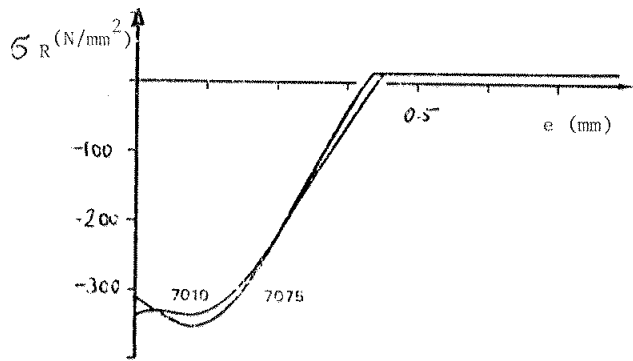


FIGURE 9 : influence du matériau de la pièce. Grenailage de forte intensité (condition G 3).

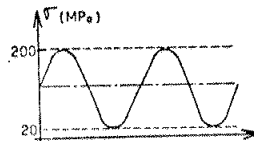
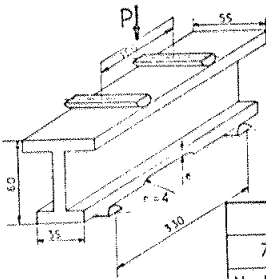
- l'augmentation de l'intensité Almen sans modification du ϕ des billes se traduit par un enfoncement des contraintes résiduelles dans le matériau sans modification de la contrainte résiduelle maximale ; la contrainte en surface est légèrement diminuée (voir fig.5). En revanche, si cette augmentation est due à l'augmentation du diamètre des grenailles, l'enfoncement des contraintes résiduelles est accompagné d'une diminution légère de la contrainte maximale sans modification de la contrainte en surface (voir figure 6)
- nous avons vu que l'augmentation du diamètre des billes se traduisait par un enfoncement des contraintes et une augmentation de la profondeur plastifiée. Le sablage avec des grains d'alumine de faibles dimensions (150-180 μ) utilisé lors de ces essais provoque au contraire une mise en surface de la contrainte résiduelle maximale et une diminution de la profondeur plastifiée (voir fig. 7)
- le grenailage de matériaux à caractéristiques mécaniques les plus élevées conduit à un pic de contraintes plus aigu dans certains cas (voir fig.8) où le grenailage est de faible intensité. Mais le cas d'un grenailage plus intense les caractéristiques mécaniques du matériau semble sans influence (fig. 9)

5 - ESSAIS DE FATIGUE

Dans le cadre de ce programme, 3 types d'essais ont été réalisés :

5.1.- Poutres travaillant en flexion

Ce type d'éprouvette est représentatif de pièces de formes complexes sollicitées en flexion. Elles ont été essayées en flexion 4 points ($R=0,1$) sous une contrainte maximale de 200 MPa. Le tableau 4 ci-dessous résume l'ensemble des essais.



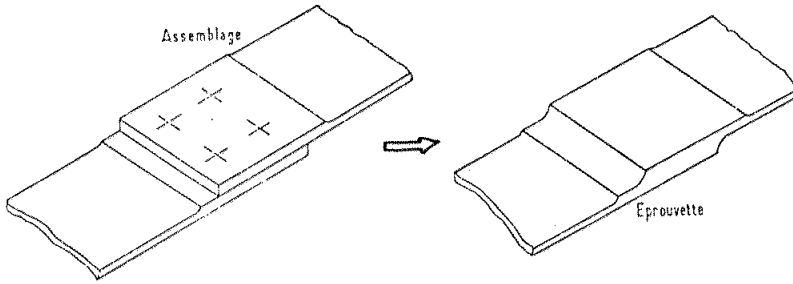
| | e = 6 | | | | e = 12 | |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 7075 | T7351 | 7010 | T73651 | 7075 | T7351 |
| | Nombre d'éprouvettes | Durée de vie moyenne | Nombre d'éprouvettes | Durée de vie moyenne | Nombre d'éprouvettes | Durée de vie moyenne |
| NON GRENAILLE | 2 | 37720 | 4 | 29220 | 6 | 37720 |
| G1 | 4 | 207530 | 4 | 131710 | 4 | 205930 |
| G2 | | | | | | |
| G3 | 4 | 347400 | | | | |
| G4 | 4 | 138940 | | | 4 | 182250 |
| G1 + G5 | 4 | 542800 | | | | |

TABLEAU 4 : résultats d'essais de fatigue sur poutres en flexion

On constate que, quelles que soient les conditions de grenailage, celui-ci apporte un gain substantiel qui n'est pas dans tous les cas en corrélation avec la flèche Almen. On notera en outre qu'un grenailage léger à la bille de verre (G5) effectué après un grenailage plus intense à la bille, l'acier (G1) apporte une amélioration supplémentaire probablement due à la restauration de l'état de surface (dans ces conditions, on a $R_a = 4,1$ $R_t = 16,3$)

5.2. - Désalignement

Ces éprouvettes sont représentatives d'une jonction boulonnée avec renfort de matage usiné dans laquelle la rupture se produit parfois au niveau du raccordement du renfort de matage. Ces éprouvettes en 2024 T 351 sont sollicitées en traction ondulée ($R = 0,1$). Les résultats sont donnés au tableau 5 ci-après.



| $\bar{\sigma}_{max}$ (MPa) | nbre de cycles | | |
|-------------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| | Non grenailé | Grenailé G5 | Sablé S1 |
| 208 | 53500 | 55000 | 31410 |
| 167 | 66770 | 107000 | 98320 |
| 142 | | 361410 | |
| 125 | 260600 | | |

4 éprouvettes par cas

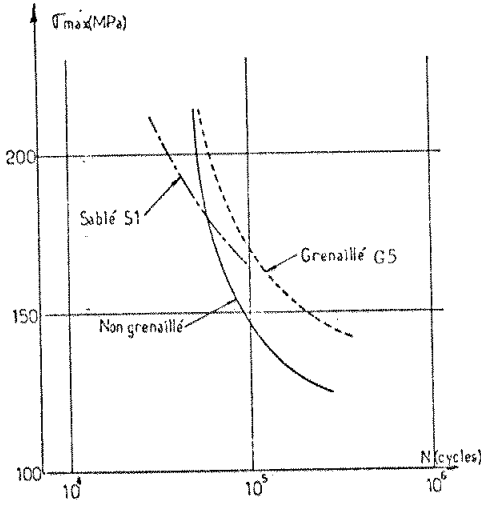


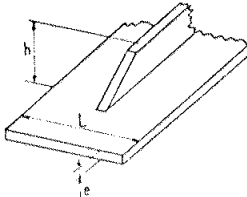
TABLEAU 5 : résultats d'essais de fatigue en traction obtenus sur des éprouvettes représentatives des désalignements de structure d'avion.

Dans l'ensemble, le gain en fatigue est moins important que pour les poutres de flexion surtout aux fortes contraintes ; on constate même une diminution due au sablage S1 sous 200 MPa. Il semble que dans ce cas également, la rugosité puisse être incriminée.

5.3.- Arrêts de raidisseurs

Ce type de géométrie se rencontre fréquemment, en particulier dans les voilures et est un point préférentiel d'apparition de criques de fatigue. Nous avons donc réalisé des éprouvettes de différentes dimensions en 7075 T 7351 qui sont essayées en traction ondulée ($R = 0,1$) sous une contrainte maximale de 200 MPa dans la section la plus chargée.

Les résultats d'essais sont présentés tableau 6 ci-dessous :



| Conditions de grenail- lage | A | B | C | D |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|
| NG | 62950 | 69610 | 49660 | 32430 |
| G1 | | | 205120 | |
| G2 | | | | 69340 |
| G3 | | | 140280 | |
| G4 | | | 89060 | 83750 |
| G5 | 67610 | | | |
| G6 | 130350 | | | |
| G7 | | 97500 | | |
| G1 + G5 | | | 133040 | |

| Type d'éprouvette | A | B | C | D |
|-------------------|-----|----|----|-----|
| e | 1,5 | 3 | 5 | 10 |
| h | 10 | 20 | 30 | 60 |
| L | 40 | 60 | 80 | 160 |

NG : non grenailié

TABLEAU 6 : résultats d'essais de fatigue en traction obtenus sur des éprouvettes représentatives des arrêts de raidisseurs de structure d'avion.

Notons tout d'abord qu'il existe un effet d'échelle non négligeable entre les divers types d'éprouvettes (qui sont rigoureusement homothétiques). En outre, on remarque, comme dans le cas des poutres de flexion, que l'amélioration due au grenailage n'est pas toujours en relation avec l'intensité de celui-ci. Dans ce cas d'essai, le grenailage bille de verre G5 ajouté au grenailage bille d'acier G1 n'apporte pas de gain supplémentaire.

6 - RELATIONS ENTRE LES RESULTATS DE FATIGUE , LES CONTRAINTES RESIDUELLES ET LA PROFONDEUR PLASTIFIEE

Nous avons tenté de corrélérer les résultats obtenus en fatigue et les répartitions de contraintes résiduelles. Le niveau de la contrainte résiduelle maximale étant du même ordre (300 à 350 MPa) dans la quasi totalité des cas de figures considérés, ce paramètre ne pourra être retenu pour expliquer les différences de comportement en fatigue observées pour des divers types de grenailage. La répartition des contraintes résiduelles est fortement influencée par la profondeur de métal plastifié, il semble donc que ce paramètre joue un rôle important dans le pourcentage d'amélioration de la tenue en fatigue ainsi que le montre la figure 10.

On peut constater que l'effet du grenailage est plus marqué lorsque les essais de fatigue sont effectués en flexion (cas de poutres) dans ce cas le pourcentage d'amélioration est compris entre 250 et 800 % alors qu'il n'est que de 0 à 300 % dans les essais de traction (cas des arrêts de raidisseurs). Il est certain que d'autres paramètres importants tels que :

- l'état de surface
- la position du point de contrainte maximale par rapport à la surface
- la relaxation des contraintes résiduelles pour différents matériaux
- etc...

n'ont pas été pris en compte dans l'élaboration de ce diagramme et peuvent également avoir une influence.

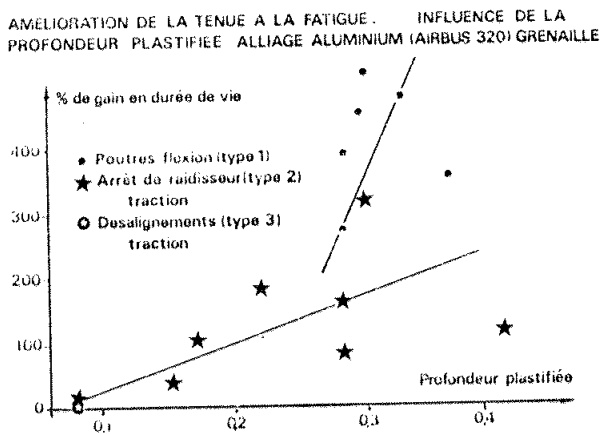


FIGURE 10

La dispersion des résultats observés sur la figure 10 (où chaque point représente une moyenne de durée de vie de plusieurs éprouvettes) résulte de la nature statistique du phénomène de fatigue mais aussi du fait que l'on a rassemblé sur le même diagramme des éprouvettes de géométries différentes. Malgré cette dispersion, on note une corrélation très nette entre l'augmentation de la durée de vie et la profondeur plastifiée.

7 - CONCLUSION

Le grenailage de précontrainte est une opération de finition utilisée depuis longtemps en aéronautique pour améliorer la tenue à la fatigue des structures. Mais, la corrélation entre tenue en fatigue et contraintes résiduelles introduite restait encore mal connue.

Le but de ces essais était de tenter d'établir une relation entre l'amélioration en fatigue et les contraintes résiduelles introduites par différents types de grenailage.

Pour des alliages étudiés (2024, 7075, 7010), ces essais ont montré que le niveau des contraintes résiduelles maximales de compression est du même ordre de grandeur quelles que soient les conditions de grenailage appliquées. En revanche, la profondeur de métal plastifié augmente avec l'intensité du grenailage ce qui modifie la répartition des contraintes résiduelles introduites. Nous avons montré qu'il existe une corrélation entre l'amélioration de la durée de vie des alliages d'aluminium essayés et la profondeur plastifiée. Suivant le type de sollicitation appliqué, le pourcentage d'amélioration de la durée de vie en fatigue est variable (250 à 800 % en flexion et 0 à 300 % en traction). Malgré la nature statistique du phénomène de fatigue qui peut être influencé par de nombreux autres paramètres (rugosité, état structural...) la plage de dispersion des résultats obtenus en donnée de vie est relativement étroite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. NIKU-LARI, JF FLAVENOT
La mesure des contraintes résiduelles
Mémoire technique n° 31
CETIM - 1977
- [2] A. NIKU-LARI
Shot-Peening
Proceedings of the first International Conference on Shot Peening
Pergamon Press - OXFORD - 1982
- [3] JF FLAVENOT, A. NIKU-LARI
Le grenailage de précontrainte
Note technique n° 15 - CETIM - Seolis.