



Tenue en fatigue

THALES / IAM



- La fatigue affecte les matériaux qui présentent une déformation plastique et/ou sévèrement cyclés.
- Elle est liée aux concentrations de contraintes (ex : fort effet de surface sur l'amorçage de fissure dans les métaux => importance des traitements de surface).
- Il s'avère qu'une pièce soumise à des contraintes cycliques rompt très souvent sous des sollicitations inférieures à la charge maximale R_m et bien souvent inférieure à la limite élastique $R_{p0,2}$.

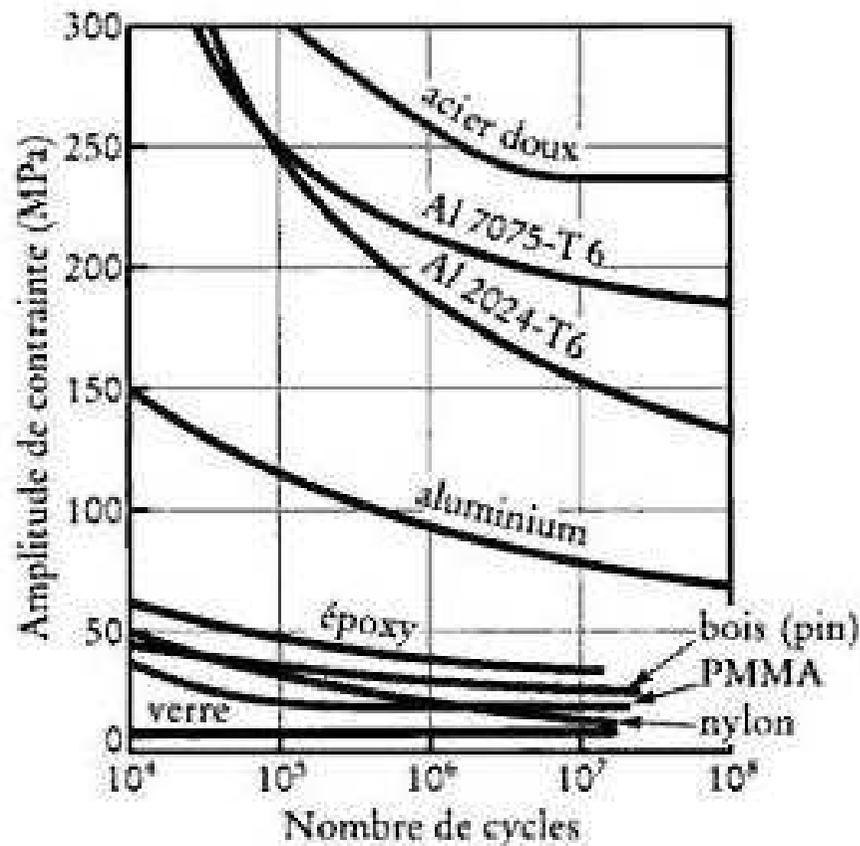
- ❑ Pour cette raison, la lecture des FT, les essais de traction ou les autres essais conventionnels ne suffisent pas pour connaître le comportement du matériau à des cycles répétés d'efforts.
- ❑ Il existe cependant des lois empiriques simples permettant de dimensionner la durée de vie du matériau.
- ❑ Ces lois ont été principalement construites en se basant sur des essais de traction-compression et principalement sur des aciers. Elles ont été extrapolées aux autres matériaux.

- La courbe de Wöhler d'un matériau représente la relation expérimentale entre l'amplitude de contraintes appliquées S et un nombre de cycles N .

- Pour la construire :
 - il faut faire subir à une série d'éprouvettes des cycles de sollicitations sinusoïdales avec une charge moyenne et une amplitude données.
 - On mesure alors le nombre N_f de cycles requis à chaque fois pour la rupture.
 - On répète plusieurs fois l'essai à différentes amplitudes de contraintes S .
 - Puis on trace la courbe : $S = f(N)$ en prenant $N = 50\%.N_f$ (sécurité).

On obtient des courbes :

- propre à chaque matériau
- Propre à la l'amplitude moyenne appliquée



- Sur chaque courbe, on peut distinguer 3 zones :
 - zone de fatigue oligocyclique (en général moins de 10E4 cycles)
 - fortes amplitudes de contraintes, durée de vie faible (Rupture précédée d'une déformation plastique notable.
 - En conception, il faut alors appliquée la limite élastique du matériau en statique.

 - zone de fatigue ou d'endurance limitée (en général entre 10E4 et 10E6 cycles) :
 - la rupture se produit après un nombre de cycle qui croît quand la variation de contraintes décroît.

 - zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité :
 - faibles amplitudes de contraintes, pas de rupture, même après 10E7 cycles.
 - La valeur cible à atteindre en conception est $N = 10E7$

- pour connaître la durée de vie d'un matériau, il faut au préalable :
 - La contrainte moyenne et l'amplitude de contraintes à appliquer à chaque cycle,
 - Le raisonnement inverse est également possible (nombre de cycles défini => application de la loi pour une contrainte moyenne => déduction d'une amplitude max).

- La déformation plastique est visible « plus rapidement » pour les matériaux métalliques. Par contre, ils sont beaucoup moins évidents pour les autres matériaux notamment élastomères car ils peuvent être très très longs (ça peut se compter en années).

- Les fatigues oligocycliques correspondent à la première partie de la courbe de Wöhler : fortes amplitudes de contraintes, faible durée de vie.
- C'est la déformation plastique qui prédomine.
- Pour une approche linéaire, on peut alors y appliquer une loi empirique :

=> loi de Coffin-Manson

$$\text{loi de Manson-Coffin : } \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (N)^c$$

$$c \sim -0.5 \text{ à } -0.7$$

$$: \varepsilon'_f \sim \text{ductilité en fatigue}$$

- Les fatigues aux grands nombre de cycles ou polycycliques correspondent à la 3ème partie de la courbe de Wöhler.
- C'est la déformation élastique qui prédomine
- Une approche linéaire de cette partie peut être obtenue à partir d'essais plus courts, en appliquant une loi empirique :

⇒ **Loi de Basquin.**

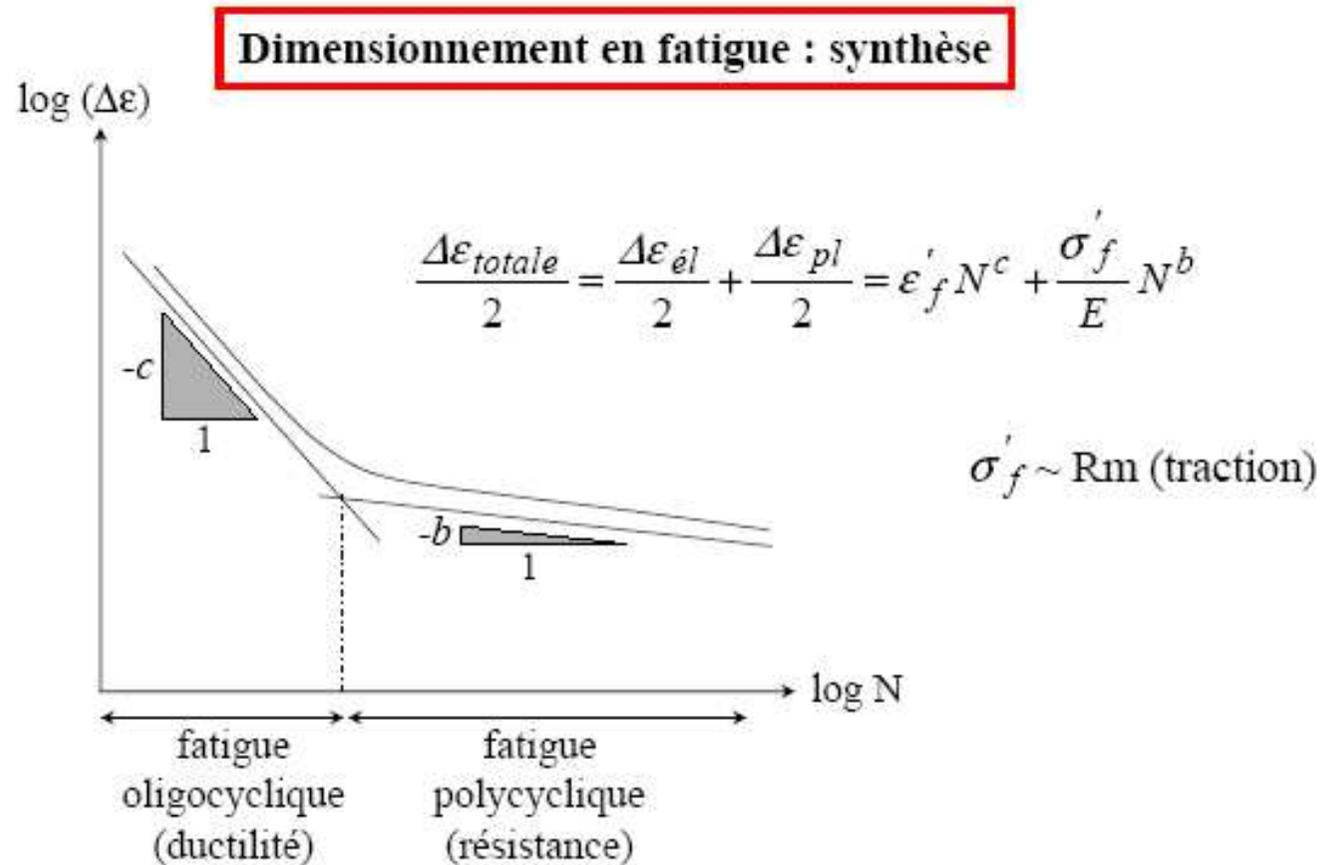
$$\text{loi de Basquin : } N\sigma_a^p = C \quad p \sim 0.12, C = f(\text{matériau})$$

$$\text{ou encore : } \sigma_a = E \frac{\Delta \varepsilon_{\text{él}}}{2} = \sigma'_f (N_R)^b$$

- En l'absence d'essais, on utilise la résistance Rm classique ; on admet alors que la limite d'endurance à 10E7 cycles en uniaxial est égale à 50% de Rm pour les aciers et 35% des Rm pour les alliages d'Al et de Cu. Mais c'est moins précis et le passage en 3D est alors plus difficile...

Dimensionnement en fatigue

- En combinant les 2 approches empiriques, on est capable d'approcher la courbe de Wöhler :





- Prévision du comportement en fatigue des joints bras es ?
 - SAC
 - SnPb
 - SnPb+

- Prévision du comportement en fatigue du cuivre dans les circuits flex ?
 - Cuivre de base lamin e
 - Cuivre électro-d epos e
 - Finition métallique...

- Applications aux matériaux pour pièces de structure...

- Il est reconnu aujourd'hui que la fiabilité de nos assemblages est principalement dépendante de la résistance des joints brasés soumis à des cycles répétés d'efforts.

- C'est pour cela que les essais d'évaluation de fiabilité d'assemblages qu'appliquent EPM sont principalement des essais de tenue à la fatigue :
 - des essais de VRT (fatigue thermique)
 - des essais de torsions alternées.

- Le système de monitoring continu permet de détecter les 3 phases classiques d'une rupture par fatigue : amorçage - propagation - rupture.

- VRT : génération de la déformation plastique par variation de température

⇒ Coffin-Manson modifié = loi de **Norris-Landzberg**

Déjà de nombreuses études sur le sujet.

Loi de Norris-Landzberg proposée actuellement :

Version **SnPb** :

$$AF = \frac{N_o}{N_t} = \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_o} \right)^{2.65} \left(\frac{t_t}{t_o} \right)^{0.136} \exp \left\{ 2185 \left(\frac{1}{T_{\max,o}} - \frac{1}{T_{\max,t}} \right) \right\}^1$$

AF – acceleration factor

N – thermal fatigue life

ΔT - temperature difference

t – dwell time (min)

T_{\max} – maximum cycle temperature (K)

o, t – operating or test conditions

- VRT : génération de la déformation plastique par variation de température

⇒ Coffin-Manson modifié = loi de **Norris-Landzberg**

Déjà de nombreuses études sur le sujet.

Loi de Norris-Landzberg proposée actuellement :

Version **SAC** :

$$AF = \frac{N_o}{N_t} = \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_o} \right)^{2.0} \left(\frac{t_t}{t_o} \right)^{0.136} \exp \left\{ 1414 \left(\frac{1}{T_{\max, o}} - \frac{1}{T_{\max, t}} \right) \right\}$$

AF – acceleration factor

N – thermal fatigue life

ΔT – temperature difference

t – dwell time (min)

T_{\max} – maximum cycle temperature (K)

o, t – operating or test conditions

Application de la loi de NL

Très souvent, ces lois NL sont utilisées en version simplifiées (extrapolation suffisante) :

$$AF = N_t / N_o = (\Delta T_t / \Delta T_o)^m$$

Version SnPb : $m = 2,65$

Version SAC 305 : $m = 1,9$

ΔT_t désigne l'amplitude de température appliquée lors du test thermique

N_t désigne le nombre de cycles avant rupture observé lors du test

ΔT_o désigne l'amplitude de température opérationnelle

N_o désigne le nombre de cycles avant rupture en opération

■ Application de la loi de NL

Exemple :

ma carte assemblée verra principalement $-40^{\circ}\text{C}/+80^{\circ}\text{C}$ en opération

⇒ $\Delta T_o = 120^{\circ}\text{C}$

Si j'applique un test de VRT avec un cycle $-50^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$, quel va être le facteur d'accélération du vieillissement ?

⇒ $\Delta T_t = 175^{\circ}\text{C}$

⇒ **AF = 2,05 en version Lead Free**

⇒ **AF = 2,7 en version SnPb**

Si la rupture est observée par exemple au bout de 500 cycles lors du test, on peut supposer que l'équipement tiendra environ :

- 1025 cycles avant rupture si elle est en version Lead Free
- 1350 cycles avant rupture si elle est en version SnPb

Fatigue des joints brasés

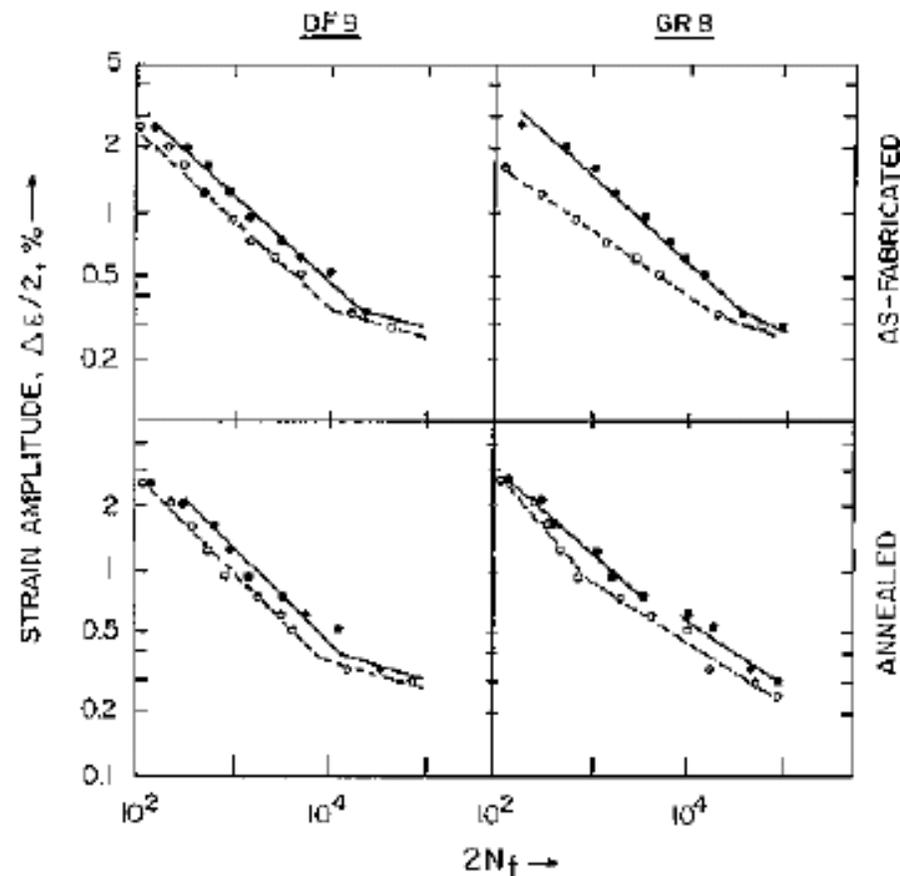
A supposer que la durée de vie de mon produit est de 20 ans,
et à raison de 1 cycle par semaine $-40^{\circ}\text{C}/+80^{\circ}\text{C}$,
combien de cycles mini doit passer mon produit en test $-50^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$
pour garantir cette durée de vie ? :

- nombre de cycles total théorique en opération $N_o = 20 \times 12 \times 4 = 960$
- nombre de cycles mini en version LF $N_t = 2,05 \times 960 = 1968$
- nombre de cycles mini en version SnPb $N_t = 2,7 \times 960 = 2592$

Comportement en fatigue des circuits flexibles ?

Quelques études sur le sujet.

Appliquer directement la loi de Coffin-Manson.



Lois de Coffin-Manson et de Norris-Landzberg

La loi de Coffin-Manson a été construite à l'origine à partir d'études sur les aciers. Il faut donc en relativiser les résultats en ce qui concernent les autres matériaux, surtout qu'une même déformation plastique ne génère pas le même endommagement selon la température. Il faut également s'appliquer à imposer le même mode de contrainte pendant le test qu'en opération (si effort de torsion, appliquer un effort de torsion).

Cependant, pour les cas simples, la loi se vérifie.

Le loi de NL propre aux alliages SAC est apparue récemment. Un premier modèle proposé en 2005 (Pan et al) a été remis en cause en 2006 puis affiné en 2008. Ce dernier modèle (rappelé dans ce doc) semble pour le moment se vérifier pour la plupart des alliages SAC employés et a été testé principalement sur des BGA, des CSP et des composants céramiques. Par contre pas de trace d'essai sur QFN.