

Annexe 2 : Comportement au fluage des superalliages

Cette partie est tirée du cours de L. Naze (ENSMP)

Les propriétés en traction **à température ambiante** de la plupart des matériaux sont peu dépendantes du temps (vitesse de chargement)

A haute température, les performances en traction dépendent à la fois de la vitesse de déformation et du temps d'exposition à haute température

→ Nouveaux mécanismes de déformation mis en jeu : systèmes de glissement activés

→ Les processus contrôlés par la diffusion sont accélérés, et ont un effet significatif sur les propriétés mécaniques : mobilité des dislocations accentuée par le mécanisme de montée

→ "Glissement" possible aux joints de grain

Nécessité de prendre en compte des **modifications microstructurales** provoquées par l'exposition prolongée à haute température : grossissement de la taille de grain par recristallisation

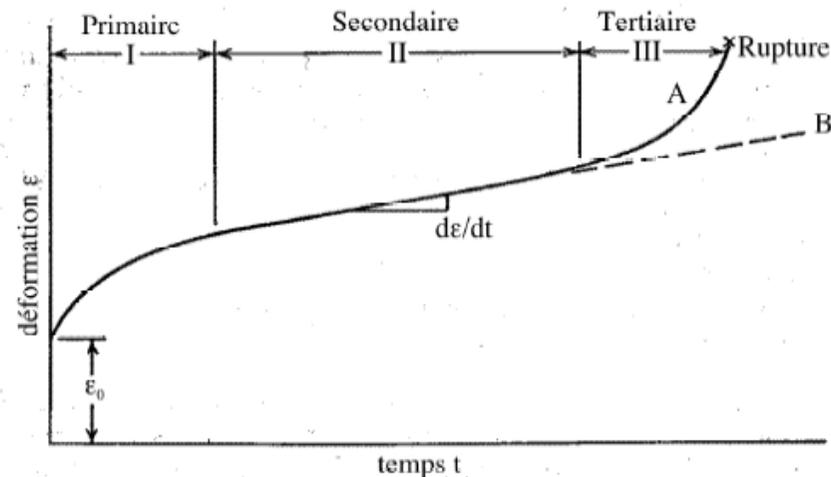
En résumé : les mécanismes mis en jeu à haute température sont largement dépendant du temps

→ Question : comment évoluent les performances mécaniques à haute température sous sollicitation constante sur des durées importantes ?

→ En pratique :

- un essai de fluage consiste à maintenir une éprouvette à haute température sous charge constante (et non sous contrainte constante), et à mesurer $\varepsilon(t)$
- la charge appliquée est telle que $\sigma < \sigma_y$
- la mise en charge \Rightarrow déformation élastique ε_0 de l'éprouvette

→ On appelle **fluage** la déformation progressive du matériau



Courbe de fluage caractéristique des alliages métalliques

→ Importance significative en ingénierie pour $T > 0,5 T_f$

La **courbe de fluage** permet généralement de différencier trois stades de fluage avant la rupture

Fluage primaire (ou fluage transitoire)

→ Décroissance de la vitesse de déformation avec le temps.

→ Mise en équation du fluage primaire par la loi du fluage parabolique ou fluage β :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m \quad \text{où } 0 < m < 1$$

Fluage secondaire (ou fluage stationnaire)

→ Vitesse de déformation constante = vitesse minimale

→ Paramètre de dimensionnement le plus important issu de la courbe de fluage

→ Le fluage stationnaire est couramment décrit par la loi puissance :

$$\dot{\varepsilon} = B \sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right)$$

où B et n sont des constantes du matériau

(n est compris entre 3 et 8 pour la plupart des métaux purs et alliages courants)

ΔH : énergie d'activation du mécanisme contrôlant la vitesse de fluage

Fluage tertiaire

→ Apparaît essentiellement dans les essais menés sous charge constante pour des contraintes croissantes

→ Augmentation de la contrainte ? Car réduction de la section de l'éprouvette :

- Apparition d'un phénomène de striction,
- Formation de vides internes à l'éprouvette.

→ Stade souvent associé à des modifications métallurgiques : grossissement précipités, recristallisation

Prédiction de la résistance à rupture en fluage

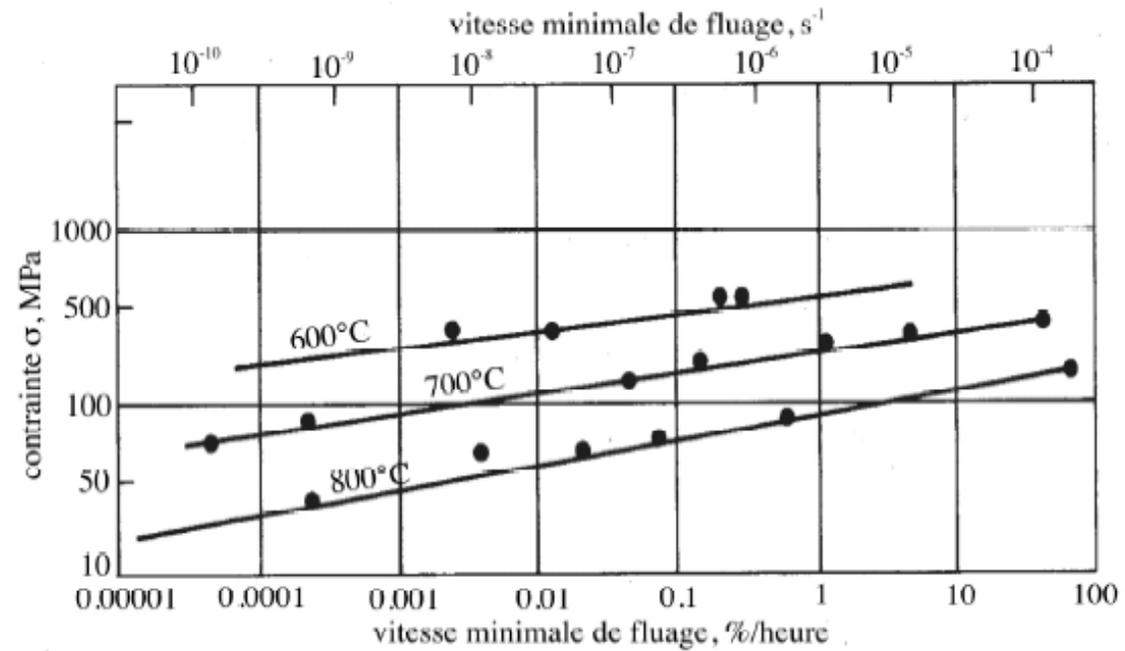
→ Modèles théoriques difficiles à mettre au point

→ Nécessité de se référer à des données expérimentales fiables

→ Extrapolation des données vers des temps ou des vitesses de déformations difficilement accessibles expérimentalement

→ Possible si **aucune modification microstructurale** ne se produit entre le domaine de temps exploré expérimentalement, et les temps vers lesquels on cherche à extrapoler

Représentation des courbes de fluage :



Contrainte de fluage en fonction de la vitesse de fluage stationnaire à différentes températures (Dieter)

Représentation de Larson-Miller

→ **F.R. Larson, J. Miller**, « *A time-temperature relationship for rupture and creep stresses* », Transactions of the ASME 174, 765-775, 1954.

→ Approche d'équivalence temps-température

→ Hypothèse :

Les transformations microstructurales se produisent généralement sur des temps plus courts pour des températures plus élevées

→ Principe :

Comparaison de la pente de la courbe à extrapoler avec les pentes des courbes de données obtenues expérimentalement à des températures plus élevées

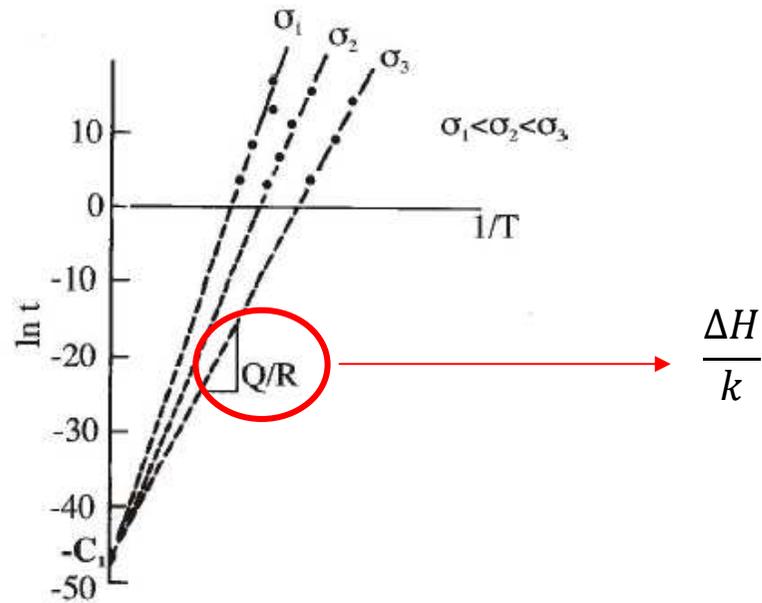
On considère que la vitesse de fluage stationnaire d'un alliage destiné à une utilisation à haute temp. s'écrit :

$$\dot{\varepsilon} = A \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right)$$

Où A est une constante supposée dépendante de la contrainte de fluage σ

A charge imposée (contrainte correspondante σ), pour un taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ donné, on peut déduire une **relation d'équivalence entre temps et température** :

$$\ln(t) = f\left(\frac{1}{T}\right) = \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{A}\right) + \frac{\Delta H}{kT}$$



Equivalence temps-température en fluage

Expérimentalement, cette relation d'équivalence reste valable lorsque : $\dot{\epsilon} = cte$

Ce principe suppose également que $\epsilon_{fluage}^r / A = cte$ sur l'intervalle de température considéré

De cette équivalence temps-température, on tire le paramètre de Larson-Miller :

$$P = Q/R = \Delta H/k = T [\ln(t_R) + C_1]$$

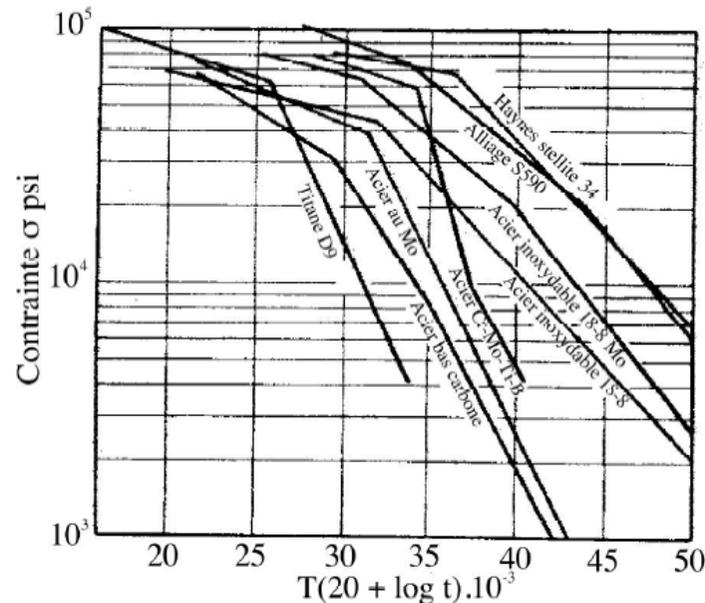
$$\text{Où } C_1 = \ln\left(\frac{A}{\epsilon_{fluage}^r}\right)$$

Rq. Les valeurs de C_1 varie de 35 à 60 selon les alliages mais la valeur typique est $C_1 \approx 46$

⇒ Relation entre **temps à la rupture** t_R et **température d'essai** T , à contrainte fixée σ :

$$\ln(t_R) = f\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{P}{T} - C_1$$

En reportant les données expérimentales (t_R, T, σ) dans le repère $(P, \ln \sigma)$, on peut également obtenir pour chaque alliage, une courbe qui se présente sous la forme de segments de droite :



Représentation Larson-Miller de courbes de fluage rupture pour divers alliages

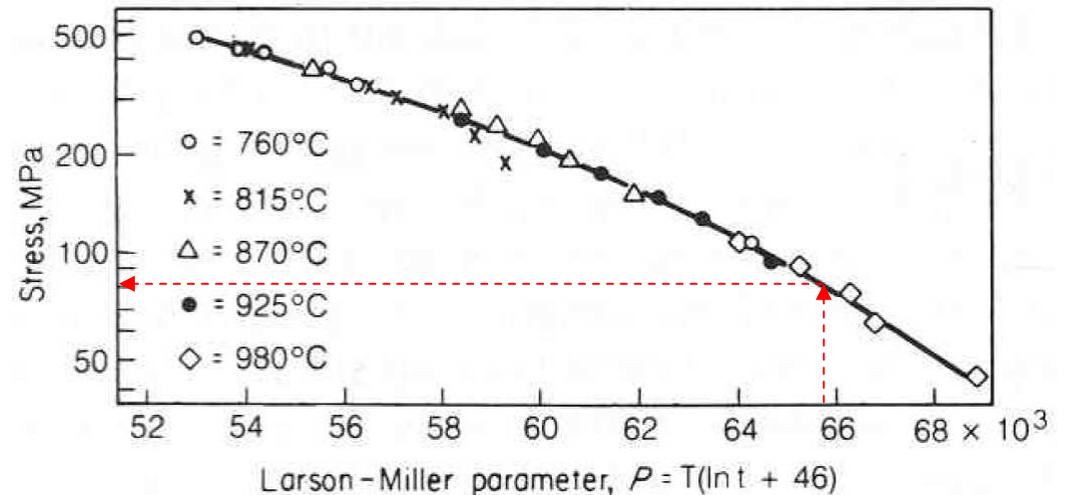
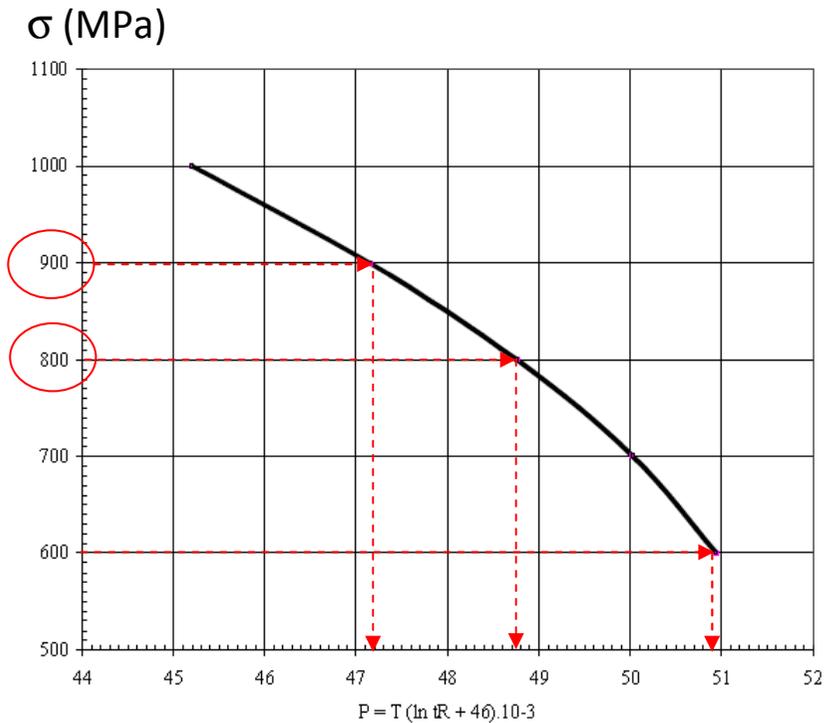
→ Courbe appelée **courbe maîtresse** = superposition de courbes de fluage à rupture $\sigma = f(t_R)$ à $\neq T$

→ Attention : le comportement en fluage rupture de nombreux alliages métalliques ne permet pas d'utiliser ce paramètre

Application 1 : fluage à rupture de superalliages aéronautiques

Matériau étudié : **Astroloy**, superalliage à base de nickel utilisé dans la réalisation de disques haute température des turbines de certains réacteurs d'avions

Courbe maîtresse en fluage rupture de l'Astroloy :



Représentation Larson-Miller de courbes de fluage-rupture de l'Astroloy

→ Extrapolations correctes pour des domaines de température : $500^\circ\text{C} < T < 980^\circ\text{C}$

Objectif : on souhaite réaliser une extrapolation du temps à rupture à un niveau de contrainte donné

Données :

- Les **contraintes de fluage** s'exerçant radialement sur le disque en Astroloy qui porte les aubes de turbines résultent de la force centrifuge créée par la rotation à grande vitesse de l'ensemble disque-aubes
- En régime permanent, ces contraintes sont de l'ordre de **800MPa**

Question 1 : évaluer la diminution du temps à rupture lorsque l'on élève la température de 650°C à 670 °C

La valeur du paramètre de Larson-Miller P à 800MPa est :

$$P=48,75.10^3$$

On peut en déduire le temps à rupture à 650°C :

$$\ln(t_R) = -46 + \frac{P}{T} = -46 + \frac{48,75.10^3}{(273.15 + 650)}$$
$$t_{R,650^\circ\text{C}} = 905 \text{ h}$$

De même, on peut en déduire le temps à rupture à 670°C :

$$t_{R,670^\circ\text{C}} = 295 \text{ h}$$

→ Conclusion : une élévation de la température d'utilisation de 20°C se traduit par une **diminution du temps à la rupture en fluage des deux tiers de sa valeur** à 650°C

Question 2 : Estimation de la contrainte à appliquer pour une durée de vie imposée

On souhaite que la pièce en astroloy respecte une durée de vie de 100000 heures à 870°C (1143K).

→ Quelle doit être la contrainte maximale à imposer à cette pièce ?

On calcule le paramètre de Miller correspondant à cette durée de vie :

$$P=1143.(\ln(t_R)+46)=65,7.10^3$$

A partir de la courbe maîtresse de l'astroloy (cf. Fig. précédente), on peut lire :

$$\sigma=85 \text{ MPa}$$

Question 3 : comparaison de superalliages

On dispose des résultats d'essais de fluage sur un nouveau superalliage à base de nickel qui pourrait "concurrencer" l'Astroloy :

- à $T = 650^\circ\text{C}$ et $\sigma = 800\text{MPa}$, $t_R = 4100$ heures
- à $T = 650^\circ\text{C}$ et $\sigma = 900\text{MPa}$, $t_R = 1100$ heures
- à $T = 700^\circ\text{C}$ et $\sigma = 600\text{MPa}$, $t_R = 600$ heures
- à $T = 700^\circ\text{C}$ et $\sigma = 800\text{MPa}$, $t_R = 250$ heures
- à $T = 700^\circ\text{C}$ et $\sigma = 900\text{MPa}$, $t_R = 70$ heures

La représentation de Larson-Miller facilite également beaucoup la comparaison entre les performances en fluage rupture de deux alliages.

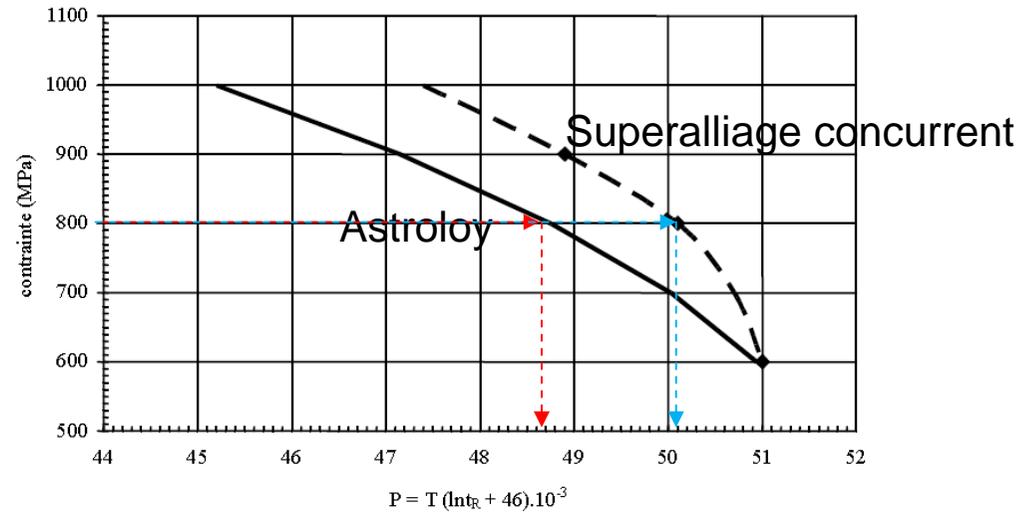
→ Données de fluage du superalliage concurrent sont-elles compatibles avec une représentation de Larson-Miller ?

A partir des valeurs expérimentales, on calcule :

1. à $T = 650^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 800\text{MPa}$, $t_R = 4100$ heures : $P = 50,1 \cdot 10^3$
2. à $T = 650^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 900\text{MPa}$, $t_R = 1100$ heures : $P = 48,9 \cdot 10^3$
3. à $T = 700^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 600\text{MPa}$, $t_R = 600$ heures : $P = 51 \cdot 10^3$
4. à $T = 700^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 800\text{MPa}$, $t_R = 250$ heures : $P = 50,1 \cdot 10^3$
5. à $T = 700^{\circ}\text{C}$ et $\sigma = 900\text{MPa}$, $t_R = 70$ heures : $P = 48,9 \cdot 10^3$

→ Les paramètres obtenus pour une même contrainte à des températures différentes sont égaux : ces données sont donc compatibles avec une représentation de Larson-Miller

→ Tracé de la courbe :



→ Calcul des temps à rupture de l'alliage expérimental pour les contraintes et les températures envisagées :

Performances (t_R) environ 4 - 6 x plus élevées pour l'alliage concurrent pour des températures entre 650 et 700°C et des contraintes entre 800 et 900 MPa

Performances similaires à bas niveau de contrainte (ici 600 MPa) : $t_R \approx 600h$