

CHAPITRE XV : FLUAGE (TD)

L. NAZE

Ce chapitre comporte une présentation générale du phénomène de fluage et des essais de caractérisation, avant le TD proprement dit (section 4).

1 FLUAGE : DEFORMATION A HAUTE TEMPERATURE

Les propriétés en traction à température ambiante de la plupart des matériaux de structure sont peu dépendantes du temps. En effet, les résultats d'un essai de traction sont peu dépendants de la 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.

A haute température, de nouveaux mécanismes de déformation peuvent être mis en jeu. De nouveaux systèmes de glissement sont éventuellement activés. Les processus contrôlés par la diffusion sont accélérés et ont un effet significatif sur les propriétés mécaniques. Ainsi, la mobilité des dislocations est accentuée par le mécanisme de montée. Le « glissement » aux joints de grains peut également participer à la déformation.

Il faut également prendre en compte les modifications microstructurales provoquées par l'exposition prolongée à haute température. Les mécanismes de recristallisation peuvent provoquer un grossissement de la taille de grain. Les alliages à durcissement structural peuvent subir un survieillissement et voir leurs caractéristiques mécaniques s'affaiblir lorsque les particules de phase durcissante grossissent.

Enfin il faut prendre en considération l'interaction avec l'environnement. Par exemple les phénomènes d'oxydation intergranulaire sont accélérés à haute température.

Les mécanismes mis en jeu à haute température étant largement dépendant du temps, on s'intéresse aux performances mécaniques à haute température, sous sollicitation constante sur des durées importantes. Dans de telles conditions, la déformation progressive du matériau est appelée fluage.

La dépendance en fonction du temps devient conséquente à partir d'une température qui est relative au matériau examiné : ce qui correspond à une haute température pour un matériau peut être classé dans les basses températures pour un autre. Pour corriger cet effet, on rapporte la température considérée à la température de fusion. Ainsi, généralement, le fluage prend une importance significative en ingénierie pour des températures supérieures à $0,5T_f$, T_f correspondant à la température absolue de fusion du matériau.

2 FLUAGE : ESSAI MECANIQUE

Un essai de traction à haute température donnera des informations sur les performances mécaniques à cette température sur des durées de vie courtes. Pour prendre en compte le facteur temps, on procédera à des essais de fluage qui consistent à maintenir la contrainte constante sur l'éprouvette de déformation.

Un essai de fluage déformation consiste à mesurer la déformation en fonction du temps. 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 la déformation en fonction du temps.

3 LA COURBE DE FLUAGE

La Figure 1 donne la forme classique d'une courbe de fluage donnant la déformation ϵ en fonction du temps t .

Un essai de fluage se pratique très généralement sous une contrainte inférieure à la limite d'élasticité macroscopique du matériau. L'étape de mise en charge se traduit alors par une déformation élastique ϵ_0 de l'éprouvette.

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

3.1 LE FLUAGE PRIMAIRE

La première partie de la courbe correspond à une décroissance de la vitesse de déformation avec le temps. Ce premier stade du fluage est appelé fluage primaire, ou fluage transitoire. A basse température et basse contrainte, comme dans le fluage du plomb à température ambiante, le fluage primaire est le régime de fluage prédominant.

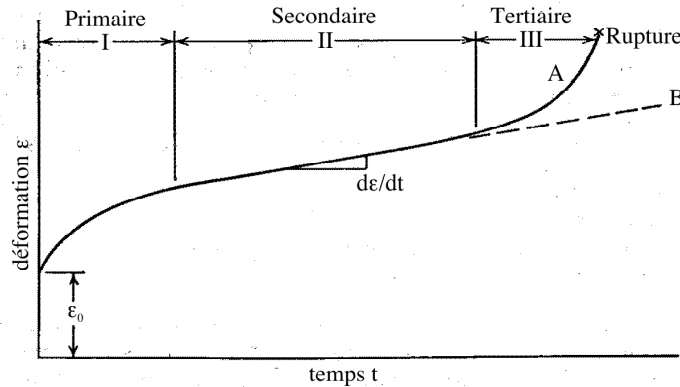


Figure 1 : Courbe de fluage typique présentant les trois stades du fluage. La courbe A correspond à un essai sous charge constante; la courbe B correspond à un essai sous contrainte constante. D'après Dieter (voir Références)

La mise en équation du fluage primaire fait intervenir le temps. On retiendra essentiellement la loi du fluage parabolique ou fluage β .

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

3.2 LE FLUAGE SECONDAIRE

Le deuxième stade du fluage est nommé fluage secondaire ou fluage stationnaire (en fait « en régime stationnaire »). Il se caractérise par une vitesse de déformation constante. Cette vitesse de déformation est appelée vitesse de déformation minimale et correspond au paramètre de dimensionnement le plus important que l'on puisse tirer de la courbe de fluage.

Le fluage stationnaire est couramment décrit par la loi puissance :

$$\dot{\varepsilon} = B\sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right) \quad [2]$$

où B et n sont des constantes du matériau et ΔH l'énergie d'activation du mécanisme contrôlant la vitesse de déformation. n est compris entre 3 et 8 pour la plupart des métaux purs et alliages courants.

3.3 LE FLUAGE TERTIAIRE

Le troisième stade du fluage est nommé fluage tertiaire.

Il apparaît essentiellement dans les essais menés sous charge constante, à haute température et forte contrainte lorsque la réduction de la section de l'éprouvette devient effective, soit lors de l'apparition d'une striction, soit à cause de la formation de vides internes à l'éprouvette. Ce troisième stade du fluage est souvent associé à des modifications métallurgiques comme le grossissement des précipités, la recristallisation ...

4 PREDICTION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FLUAGE A HAUTE TEMPERATURE

Les modèles théoriques du comportement en fluage déformation et en fluage rupture ne sont pas encore suffisamment au point pour que l'on puisse en tirer des prédictions suffisamment précises pour être utilisées en ingénierie. Il est donc nécessaire de se référer à des données expérimentales fiables.

Ces données expérimentales sont présentées sous la forme de courbes corrélant la contrainte de fluage et la vitesse de fluage stationnaire à différentes températures (Figure 2).

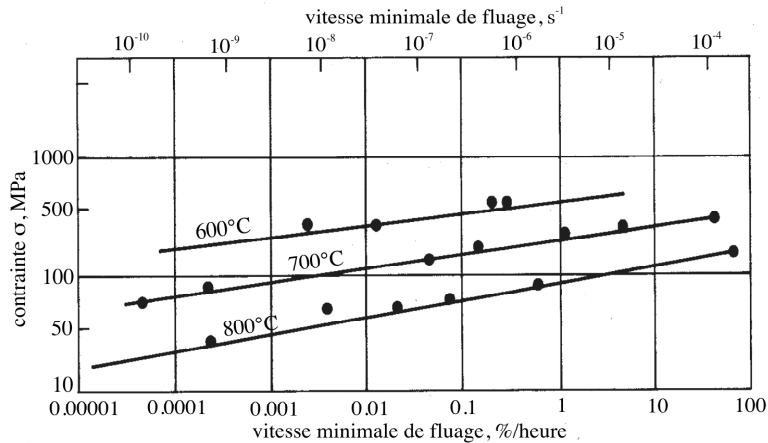


Figure 2 : Présentation de données de fluage : contrainte de fluage en fonction de la vitesse de fluage stationnaire à différentes températures. D'après Dieter (voir Références)

Une autre représentation consiste à corrélérer, à une température donnée, la contrainte et le temps de fluage pour lesquels un certain taux de déformation - ou la rupture - est atteint (Figure 3).

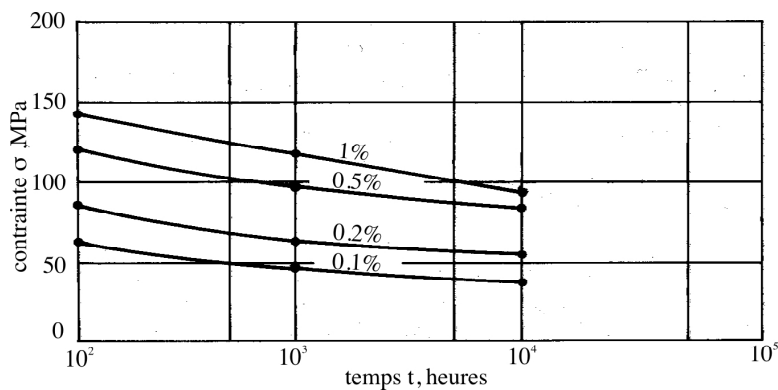


Figure 3 : Présentation de données de fluage : contrainte de fluage en fonction du temps à différents taux de déformation ou à la rupture à température donnée (ici 700°C). D'après Dieter (voir Références)

Il est souvent nécessaire d'extrapoler ces données vers des temps ou des vitesses de déformations difficilement accessibles expérimentalement. Par exemple il est difficile de déterminer expérimentalement la contrainte de fluage correspondant à une déformation de 1 % en 100 000 heures, c'est-à-dire 11,4 ans, en particulier s'il s'agit d'un matériau qui vient d'être mis au point.

L'extrapolation des courbes précédentes (Figures 2 et 3) vers des temps plus longs que ceux qui sont étudiés expérimentalement n'est envisageable que s'il est certain qu'aucune modification microstructurale ne se produit entre le domaine de temps exploré expérimentalement et les temps vers lesquels on cherche à extrapoler. En effet, une telle transformation aurait pour effet de modifier la pente de la courbe réelle en dehors du domaine exploré expérimentalement et l'extrapolation serait alors abusive.

Puisque les transformations microstructurales se produisent généralement à des temps plus courts pour des températures plus élevées, il est judicieux de comparer la pente de la courbe que l'on veut extrapoler avec les pentes des courbes de données obtenues expérimentalement à des températures plus élevées.

Sur la base de cette hypothèse, Larson et Miller ont formulé une équivalence temps-température que nous allons examiner.

4.1 REPRESENTATION DE LARSON-MILLER (TD)

4.1.1 Principe

Larson et Miller proposent une équivalence temps-température basée sur le raisonnement suivant.

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

$$\dot{\epsilon} = Ae^{-\frac{\Delta H}{kT}} \quad [3]$$

Dans cette équation, A est une constante qui est, a priori, dépendante de la contrainte de fluage et ΔH est l'énergie d'activation du mécanisme contrôlant la vitesse de fluage.

A contrainte imposée, pour un taux de déformation déterminé, déduire de cette expression la relation d'équivalence entre le temps correspondant à ce taux de déformation, et la température, sous la forme :

$$\ln t = f(T) \quad [4]$$

A partir de données expérimentales, Larson et Miller ont établi que, pour chacun des alliages qu'ils étudiaient, le tracé pour différentes contraintes σ , de $\ln t = f(1/T)$ à taux de déformation imposé, avait la forme de la Figure 4. (Noter que dans cette figure Q/R correspond à $\Delta H/k$)

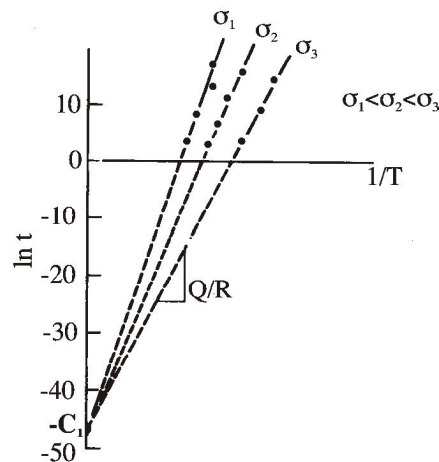


Figure 4 : Equivalence temps-température en fluage. D'après Dieter (voir Références)

Qu'en déduit-on sur la relation d'équivalence temps-température précédente ?

Toujours expérimentalement, Larson et Miller établissent que cette relation d'équivalence reste valable lorsque le taux de déformation considéré est choisi comme étant le taux de déformation à la rupture ϵ_R . On obtient alors une relation entre le temps à la rupture t_R et la température d'essai, à contrainte fixée.

De plus, pour une large gamme d'alliages, les mesures expérimentales donnent C_I tel que, lorsque t_R est donné en heures :

$$35 < C_I < 60 \quad [5]$$

Larson et Miller suggèrent que la valeur $C_I = 46$ pourrait s'avérer valable quel que soit l'alliage étudié.

De cette équivalence temps-température, on tire le paramètre de Larson-Miller qui s'écrit :

$$P = T (\ln t_R + C_I) \quad [6]$$

Larson et Miller reportent alors les données expérimentales (t_R , T , σ) dans le repère (P , $\ln \sigma$) et obtiennent, pour chaque alliage, une courbe qui se présente sous la forme de deux segments de droite (Figure 5). Cette courbe est appelée courbe maîtresse car elle représente la superposition de courbes de fluage rupture ($t_R = f(\sigma)$) à différentes températures, le paramètre permettant de modifier le temps de manière à ce que les différentes courbes se retrouvent sur une unique courbe.

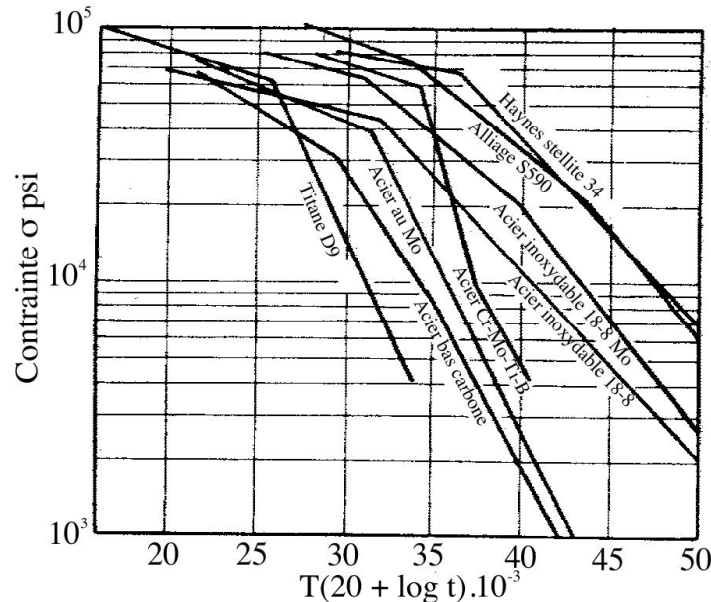


Figure 5 : Représentation Larson-Miller de résultats de fluage rupture pour divers alliages. Noter que le paramètre est exprimé ici avec un logarithme décimal ce qui justifie la valeur de 20 pour C_1 . (psi = pound per square inch). D'après Larson et Miller (voir Références)

D'après les équations précédentes, que représente la pente de chacun de ces segments de droite ?

Quelle interprétation doit-on donner au changement de pente qui apparaît aux contraintes élevées ?

Bien que Larson et Miller tentent une justification du choix de leur représentation sur la base d'une loi classique, leur démarche, qui s'appuie sur la compilation de résultats expérimentaux fiables, demeure essentiellement empirique.

4.1.2 Applications

Depuis la publication des travaux de Larson et Miller, (il y a 50 ans), il a été montré que de nombreux alliages métalliques ont un comportement en fluage rupture qui ne permet pas d'utiliser ce paramètre.

Cependant ce paramètre est couramment utilisé pour représenter les résultats de fluage rupture de certains types d'alliages dont, en particulier, les superalliages aéronautiques.

Extrapolation de temps à la rupture

La Figure 6 présente la courbe maîtresse en fluage rupture de l'Astrolloy, superalliage à base de nickel utilisé dans la réalisation de disques haute température des turbines de certains réacteurs d'avions.

Il s'agit d'une représentation en $\sigma = f(P)$ (et non plus $\ln \sigma = f(p)$) et on ne cherche pas à linéariser la relation. Le tracé de cette courbe maîtresse à partir de données expérimentales permet cependant des extrapolations (ou plutôt, en général, des interpolations) qui s'avèrent tout à fait correctes lorsque l'on reste dans des domaines de température raisonnables ($500^\circ\text{C} < T < 980^\circ\text{C}$). Par exemple, une élévation de température de 20°C des gaz pénétrant dans la turbine représente un gain appréciable du rendement du réacteur.

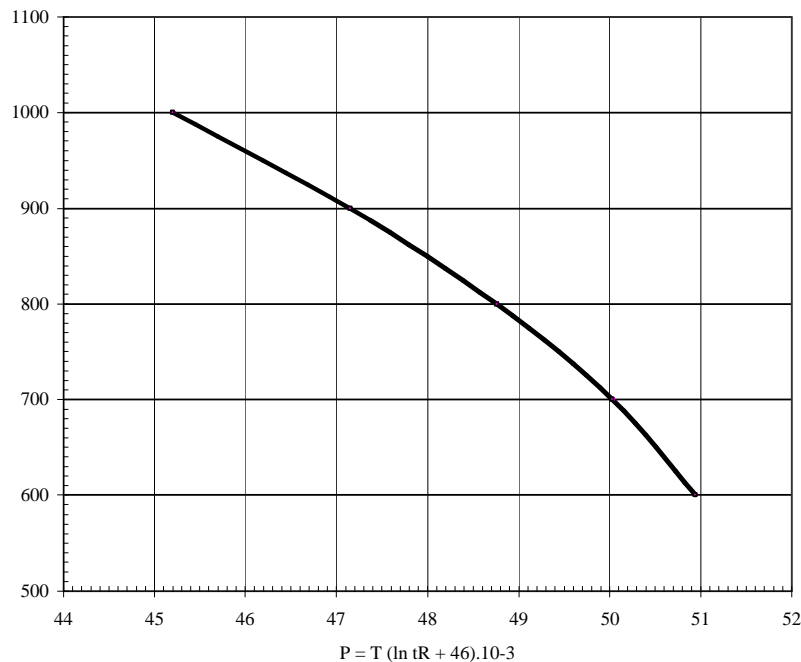


Figure 6 : Représentation Larson-Miller de résultats de fluage-rupture de l'Astroloy

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.

Évaluer la diminution du temps à la rupture auquel on peut s'attendre lorsque l'on élève la température de 650°C à 670°C.

Comparaison d'alliages

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

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

Reporter ces points expérimentaux dans la représentation de Larson Miller sur le même graphique que l'Astroloy. Comparer ce nouvel alliage à l'Astroloy. Dans quelles conditions cet alliage présente-t-il un intérêt par rapport à l'Astroloy ?

4.2 REMARQUE

Il a été précisé que le paramètre de Larson Miller n'était pas utilisable pour tous les matériaux « haute température ». D'autres paramètres d'équivalence temps-température ont été développés - on en dénombre plus de 30 - mais aucun de ceux-ci ne semble convenir à une majorité de matériaux ou même d'alliages. Ces approches sont toutes empiriques et ces paramètres sont à manipuler avec précaution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

G.E. Dieter, « *Mechanical Metallurgy* », McGraw-Hill Book Company (1988)

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

CHAPITRE XV : FLUAGE (CORRIGE)

L. NAZE

1, 2, 3, 4 FLUAGE, COURBE DE FLUAGE ET PREDICTION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FLUAGE A HAUTE TEMPERATURE

Les parties 1, 2, et 3, ainsi que le début de la partie 4 sont destinées à introduire les notions de base sur le fluage.

4.1 REPRESENTATION DE LARSON-MILLER (TD)

4.1.1 Principe

On donne l'expression de la vitesse de fluage stationnaire :

$$\dot{\epsilon} = Ae^{-\frac{\Delta H}{kT}} \quad [1]$$

Il est facile d'en déduire :

$$\ln t = \ln \frac{\epsilon}{A} + \frac{\Delta H}{kT} \quad [2]$$

Noter au passage que :

$$\frac{\Delta H}{k} = \frac{Q}{R} \quad [3]$$

Il n'est d'ailleurs pas justifié d'utiliser $\Delta H/k$ puisque l'on ne s'aventure pas dans les évaluations de volumes d'activation.

Relation d'équivalence temps-température :

Lorsqu'on fait tendre $1/T$ vers 0, $\ln t = \ln \frac{\epsilon}{A}$ est indépendant de σ .

Cette constante est notée C_1 . On écrit alors :

$$\ln t = -C_1 + \frac{\Delta H}{kT} \quad [4]$$

Larson et Miller « extrapolent » cette expression au temps à la rupture :

$$\ln t_R = -C_1 + \frac{\Delta H}{kT} \quad [5]$$

Signification de la pente des segments de droite et interprétation du changement de pente qui apparaît aux contraintes élevées dans la représentation de Larson-Miller.

Cette question réclame sans doute un bon niveau de connaissances en dislocations et déformation plastique.

L'inverse de la pente d'un segment de droite dans la représentation de Larson-Miller correspond à :

$$\left(d\sigma / d\left(\frac{Q}{R}\right) \right)^{-1} \quad [6]$$

Cette expression traduit la variation de l'énergie d'activation apparente en fonction de la contrainte, ce qui correspond au volume d'activation du mécanisme de mouvement des dislocations contrôlant le fluage. Le volume d'activation représente physiquement le volume moyen de la « structure » de dislocation impliqué dans le mécanisme de déformation. C'est un paramètre important qui donne des informations précieuses sur le mécanisme de déformation car sa valeur est caractéristique du mécanisme (franchissement des précipités durcissants par cisaillement ou par contournement, par exemple).

Les changements de pente peuvent donc correspondre à des changements de mécanisme contrôlant la déformation (en fonction de la contrainte et de la température).

4.1.2 Applications

Extrapolation de temps à la rupture

Sur la représentation de Larson-Miller de la figure 6 on relève la valeur du paramètre à 800MPa : $p = 48,75$ ou $P = 48,75 \cdot 10^3$.

On en déduit qu'à 650°C :

$$\ln t_R = -46 + \frac{P}{T} = -46 + \frac{48,75 \cdot 10^3}{(273,15 + 650)} \quad [7]$$

d'où $t_{R,650^\circ\text{C}} = 905$ heures.

À 670°C, on trouve de même : $t_{R,670^\circ\text{C}} = 295$ heures.

Une élévation de la température d'utilisation de 20°C au-dessus de 650°C se traduit donc par une diminution du temps à la rupture en fluage des deux tiers de sa valeur à 650°C.

Comparaison d'alliages

À partir des données fournies dans l'énoncé, 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 : $P = 48,9 \cdot 10^3$

On vérifie que ces données de fluages sont compatibles avec une représentation de Larson-Miller puisque les paramètres obtenus pour une même contrainte à des températures différentes sont égaux.

Le report de ces paramètres sur le graphique de la Figure 6 de l'énoncé permet de tracer une courbe à partir de laquelle on pourra calculer les temps à la rupture de l'alliage expérimental pour les contraintes et les températures d'utilisation envisagées.

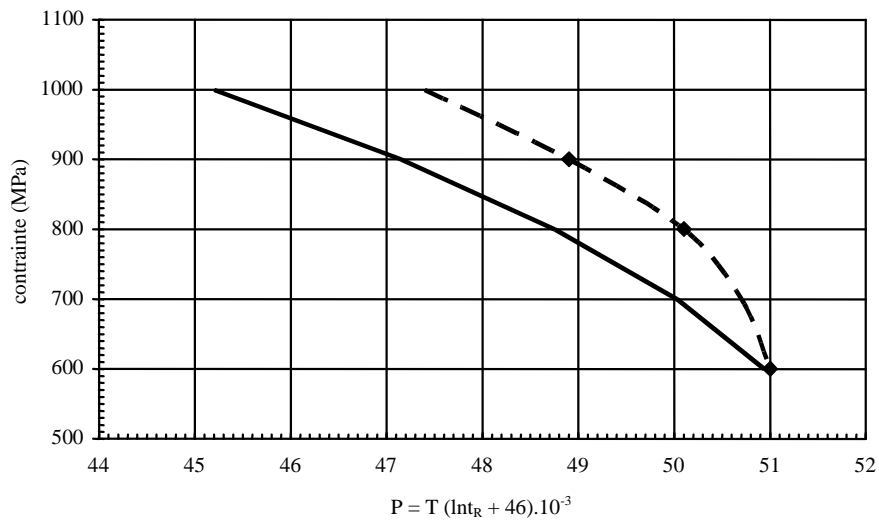


Figure 6 de l'énoncé : Représentation Larson-Miller de résultats de fluage-rupture de l'Astroloy et de l'alliage expérimental

Le calcul de temps à la rupture pour des températures entre 650 et 700°C et des contraintes entre 600 et 1000 MPa montre que les couples (température, temps à la rupture) de cet alliage expérimental ne diffèrent sensiblement de ceux de l'Astroloy qu'à contrainte relativement élevée.