

Description des effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte sur les propriétés en fatigue à l'aide du modèle de Weibull : application à des éprouvettes entaillées de TA6V

**V. ROUÉ^{a, b}, C. DOUDARD^a, S. CALLOCH^a,
Q. PUJOL D'ANDREBO^b, F. CORPACE^b**

a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (FRE 3744) - 2 rue François Verny, 29200 BREST

b. Safran Aircraft Engines – Rond-point René Ravaut, 77550 MOISSY-CRAMAYEL

Résumé :

Le dimensionnement en fatigue de structures à partir des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles des matériaux peut s'avérer complexe. Il est parfois nécessaire d'utiliser des éprouvettes intermédiaires afin de rendre compte des différents effets structuraux pouvant intervenir dans le dimensionnement. Des modèles proposent déjà la prise en compte des effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte, comme le modèle de Weibull. Pour développer ces modèles et caractériser les différents effets, des essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées de TA6V, et un premier modèle de Weibull a été appliqué à ces éprouvettes pour estimer leurs limites d'endurance moyenne ainsi que la dispersion.

Abstract :

The transition from high cycle fatigue properties of a material to HCF life prediction for structures could be difficult. The use of intermediate test specimens is sometimes relevant to describe structural effects, including the volume effect and the stress heterogeneity effect. Some models already describe these effects, for example the Weibull's weakest-link theory. To develop these models, tests had been performed on notched and smooth TA6V specimens, and the Weibull model is applied to estimate the HCF strength and the dispersion.

Mots clefs : Fatigue HCF, Modèle de Weibull, auto-échauffement, TA6V

1 Introduction

Les aubes de turboréacteurs aéronautiques sont des pièces à la géométrie complexe, pouvant comporter des concentrations de contraintes importantes. De forts gradients de contrainte peuvent donc apparaître au sein des pièces lors de sollicitations particulières. Cependant la caractérisation en fatigue à grand nombre de cycles des matériaux, et notamment du TA6V, se fait sur éprouvettes avec une sollicitation homogène en contrainte. Ainsi le passage à partir des résultats en fatigue sur éprouvettes caractérisant le matériau, vers les géométries complexes des pièces, reste délicat. Les difficultés résident dans les effets de volumes, d'hétérogénéités de contrainte, mais également dans la prise en compte de la dispersion résultant du caractère probabiliste de la fatigue à grand nombre de cycles.

De plus la caractérisation en fatigue s'avère coûteuse en éprouvettes et en temps. La détermination des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'auto-échauffement se révèle très efficace pour réduire les coûts et le temps de caractérisation en fatigue, permettant ainsi de déterminer de façon rapide l'influence de différents paramètres sur la limite d'endurance du matériau ou de la structure. [1]

Munier a proposé une modélisation probabiliste à deux échelles des mesures d'auto-échauffement qui permet également de décrire le comportement en fatigue à l'aide du modèle de Weibull [2]. Ainsi à l'aide d'essais d'auto-échauffements, il est possible d'identifier rapidement le module de Weibull m , paramètre qui rend compte de la dispersion des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles. Munier a validé le lien entre la dispersion observée en fatigue et le paramètre m , identifié à partir d'essais d'auto-échauffement, pour de nombreux matériaux. [3]

Une première étape est donc d'appliquer la méthode d'auto-échauffement sur le TA6V, pour déterminer le module m , et ainsi de réaliser une comparaison avec la dispersion obtenue avec des essais de fatigue. Le modèle de Weibull sera ensuite appliqué sur des géométries d'éprouvettes entaillées, et confronté avec des résultats d'essais de fatigue. Le choix d'éprouvettes entaillées a été réalisé afin d'étudier et de rendre compte des différents effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte. Les différentes éprouvettes permettent de vérifier la cohérence et l'applicabilité du modèle de Weibull pour la détermination des propriétés en fatigue, limite d'endurance et dispersion.

Dans un premier temps, le modèle de Weibull est présenté, et notamment sa prise en compte naturelle des effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte. Ensuite, une modélisation des courbes d'auto-échauffement est présentée. En effet les paramètres du modèle de Weibull apparaissent dans cette modélisation, et vont donc être estimés à partir d'essais d'auto-échauffement réalisés sur des éprouvettes cylindriques de TA6V.

Pour finir, le modèle de Weibull va être mis en œuvre sur des géométries d'éprouvettes entaillées, et il sera confronté à une campagne d'essais de fatigue réalisée sur trois géométries d'éprouvettes axisymétriques entaillées et sur la géométrie cylindrique de référence. Les résultats obtenus, notamment sur la dispersion en fatigue, seront comparés.

2 Modèle de Weibull

Afin de prendre en compte les effets de volume, le modèle le plus simple et le plus populaire est le modèle de Weibull à deux paramètres [4]. Il repose sur la théorie du maillon le plus faible. En effet, une éprouvette plus longue aura une probabilité plus forte de contenir un défaut critique, et aura donc une limite d'endurance plus faible.

2.1 Modèle de Weibull sous sollicitation homogène

Dans le cas d'une sollicitation homogène d'un matériau de volume V , la probabilité de rupture lié à une amplitude de contrainte appliquée Σ_0 s'écrit dans le cadre du modèle de Weibull [4]

$$P_F = 1 - \exp\left(-\frac{V}{V_0}\left(\frac{\Sigma_0}{S_0}\right)^m\right), \quad (1)$$

où m désigne le module de Weibull, et le terme $V_0 S_0^m$ est un paramètre matériau à identifier. À partir de de cette probabilité de rupture, la limite d'endurance moyenne $\bar{\Sigma}_\infty$, ainsi que l'écart type associé $\bar{\bar{\Sigma}}_\infty$ s'écrivent

$$\bar{\Sigma}_\infty = S_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), \quad (2)$$

$$\bar{\bar{\Sigma}}_\infty = S_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)}. \quad (3)$$

L'équation (2) rend compte de l'effet de volume, en effet une limite d'endurance moyenne est associée à un volume V , et plus celui-ci augmente, plus la limite d'endurance diminue. De plus la dispersion, souvent caractérisée par le coefficient de variation (i.e. le rapport de l'écart type sur la moyenne) ne dépend que du module de Weibull m selon l'équation

$$CV = \frac{\bar{\bar{\Sigma}}_\infty}{\bar{\Sigma}_\infty} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} = f(m). \quad (4)$$

2.2 Modèle de Weibull sous sollicitation hétérogène

Sous sollicitation hétérogène, Hild [5] introduit la notion de volume effectif V_{eff} et ainsi la probabilité de rupture de la structure s'écrit sous la forme

$$P_F = 1 - \exp\left(-\int_{\Omega} \frac{1}{V_0} \cdot \left(\frac{\Sigma_0(M)}{S_0}\right)^m dV\right) = 1 - \exp\left(-\frac{V_{eff}}{V_0} \left(\frac{\Sigma_F}{S_0}\right)^m\right), \quad (5)$$

avec $\Sigma_F = \max_{\Omega}(\Sigma_0(M))$. Le volume effectif est alors défini par $V_{eff} = \int \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_F}\right)^m dV$. À partir de l'équation (6), la limite d'endurance de la structure s'écrit alors

$$\bar{\Sigma}_\infty = S_0 \left(\frac{V_0}{V_{eff}}\right)^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right). \quad (6)$$

Une limite d'endurance moyenne est ainsi associée à un volume effectif, qui prend naturellement en compte les effets de volume et les effets d'hétérogénéité de contrainte.

3 Essais d'auto-échauffement

Les essais d'auto-échauffement permettent la détermination rapide de la limite d'endurance moyenne. Cette méthode repose sur l'observation expérimentale de l'évolution de la température moyenne stabilisée sur l'éprouvette au cours de blocs à amplitude de chargement croissante (figure 2). À partir d'un certain niveau de chargement, la température captée augmente de façon significative, cela apparaît autour de la limite d'endurance. En effet l'élévation de température s'explique par des mécanismes dissipatifs, également impliqués dans l'endommagement en fatigue des matériaux. Ainsi lorsque l'amplitude de chargement dépasse la limite d'endurance moyenne du matériau, les mécanismes dissipatifs sont activés et la température mesurée au cours des essais augmente fortement. [1]

Afin de rendre compte du caractère probabiliste de la fatigue, un modèle multi-échelle a été développé à partir d'une population de sites de microplasticité, possédant une distribution aléatoire de limite d'élasticité. Le VER de volume V_0 considéré est alors constitué d'un ensemble d'inclusions élasto-plastiques dans une matrice élastique. Une inclusion dans laquelle la plasticité se développe, est appelée site actif. L'activation des sites suit un processus ponctuel de Poisson. Ainsi dans un volume V , le nombre moyen de sites actifs N est défini par l'équation

$$N = \lambda(\Sigma_0).V = \frac{V}{V_0} \left(\frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m. \quad (7)$$

Ainsi la densité de sites actifs λ dépend de l'amplitude de chargement par une loi puissance. Une représentation schématique de l'évolution du nombre de sites actifs est proposée en figure 2. [1]

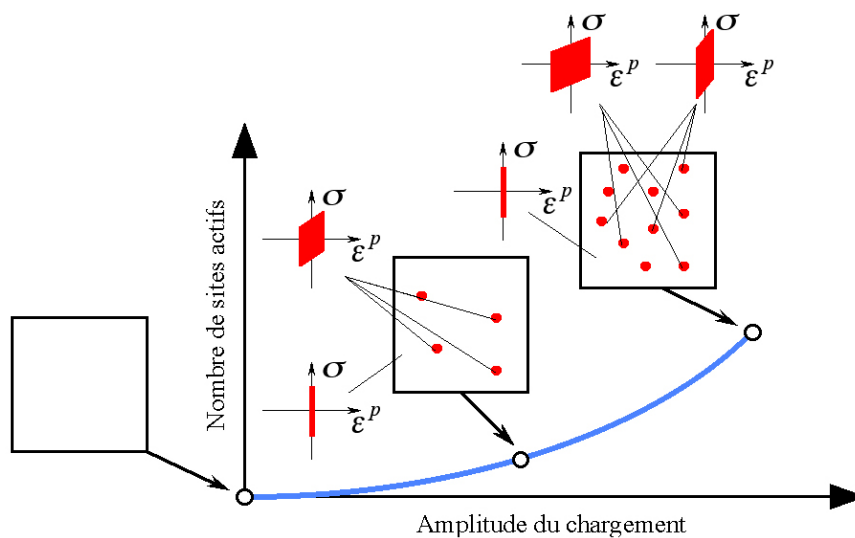


Figure 1 : Activation des sites de microplasticité en fonction de l'amplitude de chargement

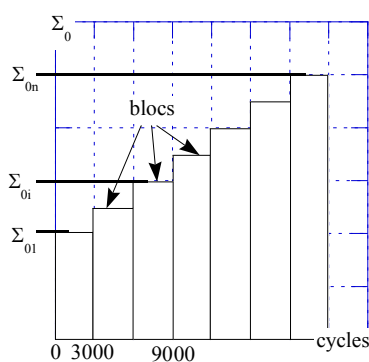
En connaissant le nombre de sites actifs à une amplitude de chargement donné, il est possible de calculer la dissipation de ces sites, et en résolvant l'équation de la chaleur, d'obtenir la température stabilisée. La courbe d'auto-échauffement peut donc être modélisée (avec la prise en compte d'un régime primaire [2]). La température stabilisée en fonction de l'amplitude de chargement s'écrit

$$\bar{\theta}(\Sigma_0) = \alpha. \Sigma_0^2 + \eta V_0. \frac{m}{(m+1)(m+2)}. \frac{\Sigma_0^{m+2}}{V_0 S_0^m}. \quad (8)$$

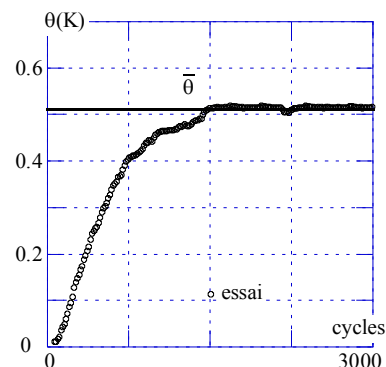
L'utilisation de l'hypothèse du maillon le plus faible (i.e. si un seul site est actif, la rupture de la structure est inévitable) permet d'obtenir à l'aide du processus ponctuel de Poisson, et de la densité de sites actifs λ proposé précédemment, une probabilité de rupture identique à celle du modèle de Weibull, et justifie donc l'utilisation des mêmes notations.

La dispersion des résultats en fatigue est alors reliée au caractère aléatoire de l'apparition de sites de microplasticité. Le module de Weibull peut alors être identifié par des essais d'auto-échauffement. Munier observe une bonne prédiction de la dispersion pour de nombreux matériaux testés, avec parfois un léger conservatisme lors de l'identification du module de Weibull par auto-échauffement. [3]

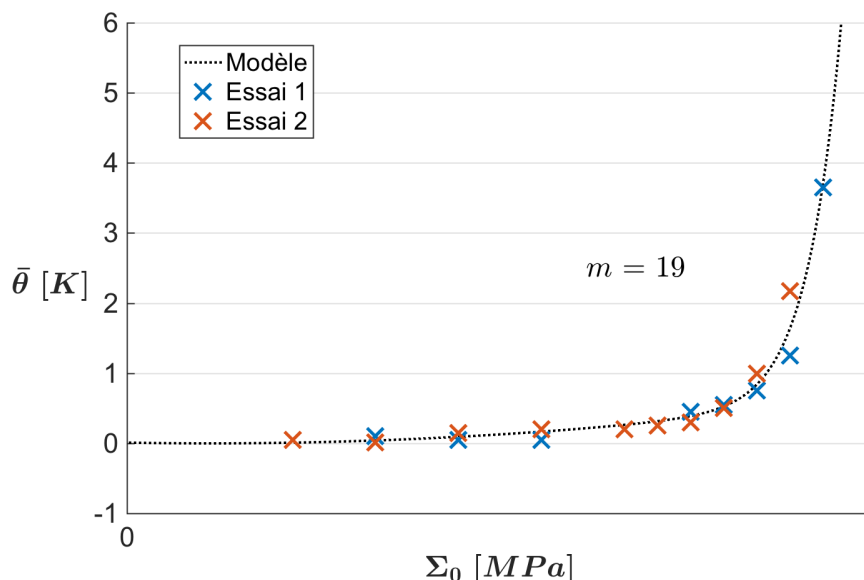
L'application de la méthode d'auto-échauffement et la détermination du module de Weibull m à partir du modèle probabiliste multi-échelle sont présentées en figure 2.



a) Succession de blocs à des amplitudes de chargements croissantes



b) Observation de la température au cours d'un bloc de chargement [3]



c) Courbes d'auto-échauffement pour deux éprouvettes cylindriques de TA6V et détermination du module de Weibull m .

Figure 2 : Principe d'un essai d'auto-échauffement et courbes d'auto-échauffement pour le TA6V

4 Approche probabiliste volumique sur éprouvettes entaillées

Le module de Weibull m intervient dans plusieurs aspects de la modélisation. Dans le modèle de Weibull, la dispersion est uniquement fonction de ce paramètre. Il influence aussi les effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte en intervenant dans le calcul du volume effectif. De plus, le modèle probabiliste multi-échelle de l'auto-échauffement fait intervenir le module de Weibull dans la description de la courbe d'auto-échauffement. Il faut alors se poser la question de la pertinence d'un unique paramètre m pour rendre compte de ces nombreux effets.

4.1 Résultats expérimentaux

Des essais de fatigue en traction ont été menés sur trois géométries différentes d'éprouvettes axisymétriques entaillées, et sur une géométrie d'éprouvette cylindrique de référence (géométrie d'éprouvette utilisée pour les essais d'auto-échauffement). Ces quatre géométries d'éprouvettes possèdent une section minimale identique. Les différentes amplitudes de contrainte présentées par la suite sont en contrainte nominale, par rapport à cette même section

Le tableau 1 expose les résultats des essais de fatigue réalisés sur les éprouvettes entaillées. Les rayons d'entailles sont relativement élevés et de ce fait les concentrations de contrainte aux points critiques restent modérées. Une vingtaine d'éprouvettes ont été testées par géométrie. Un dépouillement probabiliste des essais de fatigue permet de déterminer la limite d'endurance moyenne à 10^7 cycles des différentes géométries d'éprouvettes entaillées, résultats normés par la limite d'endurance moyenne à 10^7 cycles de l'éprouvette cylindrique de référence.

Rayon de l'entaille :	30 mm	10 mm	6 mm
Concentration de contrainte K_t :	1,03	1,09	1,16
$\bar{\Sigma}_\infty / \bar{\Sigma}_\infty ref$	1,077	1,022	0,984

Tableau 1 : Résultats des essais sur éprouvettes entaillées

Le dépouillement probabiliste a également mis en évidence la dispersion des essais de fatigue et permet d'identifier un module de Weibull $m = 23$ pour l'ensemble des quatre lots d'éprouvettes testées. Le coefficient de variation est donc de $CV = 0,054$, valeur de référence pour la suite de l'étude.

L'analyse des courbes d'auto-échauffement a permis d'identifier un module de Weibull de $m = 19$ sur les éprouvettes cylindriques de référence, soit un coefficient de variation $CV = 0,065$. Un très léger conservatisme est donc constaté par la méthode d'auto-échauffement, en accord avec les constatations réalisées par Munier. [3]

4.2 Modélisation éléments finis et nature du problème

Une modélisation éléments finis des trois géométries d'éprouvettes entaillées a été réalisée. Des modèles axisymétriques ont été retenus, avec une loi matériau purement élastique (domaine de la fatigue HCF). Les éprouvettes présentent, de par leurs géométries axisymétriques et leurs entailles, un changement de l'état de contrainte. En effet, le taux de triaxialité varie sein des éprouvettes entaillées (figure 3).

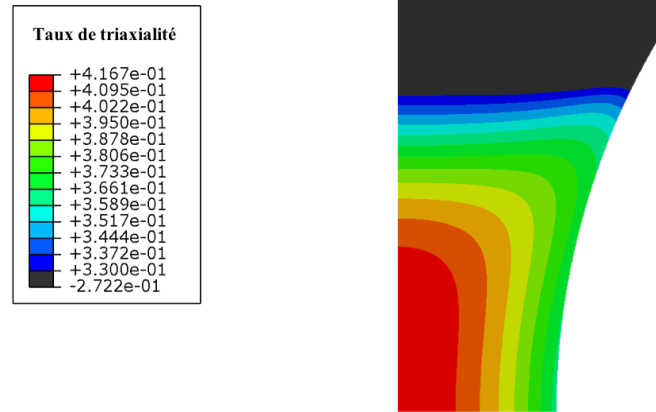


Figure 3 : Taux de triaxialité dans une des éprouvettes entaillées

Ainsi les géométries entaillées entraînent deux types d'hétérogénéités de contrainte ; la variation de section dans la longueur de l'éprouvette engendre un premier gradient de contrainte. De plus l'effet d'entaille, et donc la concentration de contrainte, conduit à une deuxième source d'hétérogénéité de contrainte.

Afin de comparer la limite d'endurance moyenne des différentes géométries d'éprouvettes, leurs volumes effectifs sont évalués. À partir des résultats des calculs éléments finis, il est possible de calculer le volume effectif d'une éprouvette en faisant la somme sur ses éléments, alors considérés comme étant sollicités de façon homogène

$$V_{eff}(m) = \int \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^m dV = \sum_e \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \right)^m V_e . \quad (9)$$

De plus, afin de comparer les éprouvettes les unes par rapport aux autres, un volume effectif équivalent V_{eff}^* est défini et est calculé par rapport à une contrainte de référence σ_{ref} . Cette contrainte de référence a été choisie comme étant la contrainte nominale des éprouvettes σ_{nom} (qui ont une section minimal identique). Le calcul du volume effectif équivalent est réalisé à partir de la contrainte principale σ_{xx} , dans la direction de sollicitation de l'éprouvette

$$V_{eff}^*(m) = \sum_e \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{nom}} \right)^m \cdot V_e = K_t^m \cdot V_{eff}(m) . \quad (10)$$

Ainsi à partir de l'équation (7), il est possible de déterminer $\bar{\Sigma}_{\infty} / \bar{\Sigma}_{\infty ref}$, avec la relation

$$\frac{\bar{\Sigma}_{\infty}}{\bar{\Sigma}_{\infty ref}} = \left(\frac{V_{eff ref}^*(m)}{V_{eff}^*(m)} \right)^{\frac{1}{m}} . \quad (11)$$

4.3 Application de l'approche probabiliste

Une modélisation éléments finis de l'éprouvette de référence a également été réalisée. En effet du fait des rayons de raccordement en ses deux extrémités, la sollicitation de l'éprouvette n'est pas totalement homogène et le volume effectif équivalent V_{eff}^* de l'éprouvette cylindrique de référence varie également. La figure 5 présente les volumes effectifs équivalents, calculés à partir de la contrainte principal σ_{xx} (dans la direction de sollicitation en traction) pour les quatre géométries d'éprouvette en fonction du module de Weibull m .

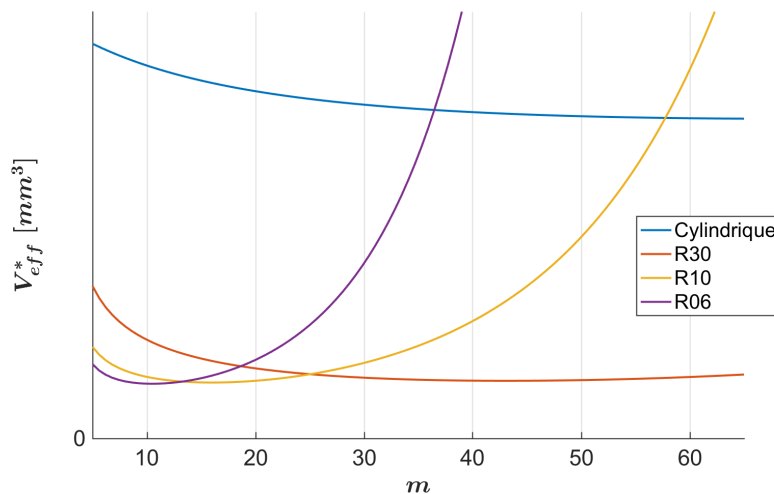


Figure 4 : Volumes effectifs V_{eff}^* des éprouvettes en fonction du module de Weibull

Bien que les éprouvettes entaillées possèdent des volumes plus importants par rapport à l'éprouvette cylindrique de référence, leurs volumes effectifs équivalents V_{eff}^* sont plus faibles lorsque m est faible. Cela s'explique par l'augmentation de la section, et donc par le fait qu'un volume moins important de matière soit fortement sollicité. Par exemple, pour l'éprouvette ayant un rayon d'entaille de 6 mm le volume effectif équivalent V_{eff}^* est moins important, bien qu'il s'agisse de l'éprouvette ayant le plus grand volume. Le rayon d'entaille étant plus sévère, la section de l'éprouvette augmente plus rapidement. L'hétérogénéité de contrainte est alors plus importante, et donc son volume effectif équivalent V_{eff}^* est moindre.

Par la suite, les volumes effectifs équivalents des éprouvettes entaillées tendent à augmenter de nouveau avec l'augmentation de m . Cela s'explique par la concentration de contrainte induite par l'effet d'entaille, le terme K_t^m devient prédominant dans le calcul du volume effectif équivalent V_{eff}^* . En effet en analysant l'équation (9), on constate que le volume effectif V_{eff} ne peut que diminuer avec l'augmentation de m .

À partir de l'équation (11), les limites d'endurance des éprouvettes peuvent être déterminées en fonction du module de Weibull et sont présentées à la figure 5.

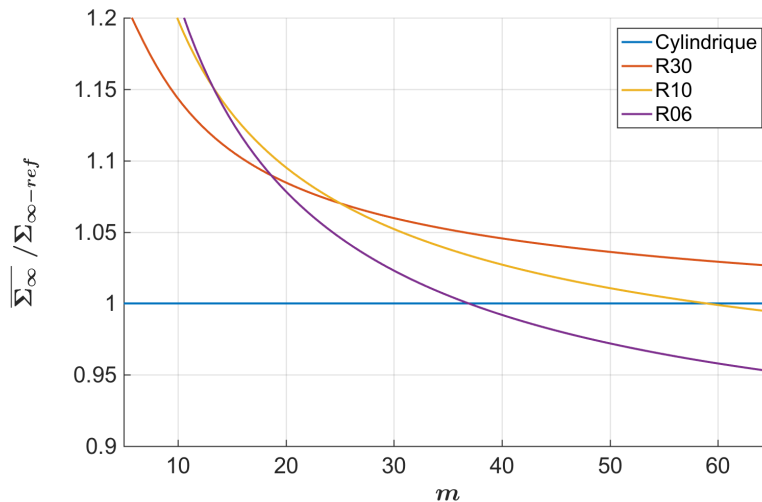


Figure 5 : Résultats sur les limites d'endurance moyennes avec l'approche V_{eff}^*

Un module de Weibull $m = 39$ est identifié pour cette approche en V_{eff}^* . L'identification se fait en minimisant les écarts avec les limites d'endurance moyenne déterminées par les essais de fatigue. Cette identification est en accord avec la valeur trouvée par Härkegård [6] sur des éprouvettes entaillées de 30CrNiMo8 (aux concentrations de contrainte plus importantes). Il identifie un module de Weibull de $m = 42$, en minimisant les écarts avec les résultats expérimentaux. La dispersion n'est pas analysée dans son étude.

Dans le tableau 2, les limites d'endurance moyenne sont comparées à celle obtenues par l'approche en V_{eff}^* pour les modules de Weibull identifiés à partir de la dispersion des essais de fatigue (référence) et des essais d'auto-échauffement.

	m	CV	R30 : 1,077	R10 : 1,022	R06 : 0,984
Identification V_{eff}^*	39	0,032	1,046	1,028	0,993
Dispersion fatigue	23	0,054	1,075	1,078	1,057
Auto-échauffement	19	0,065	1,089	1,102	1,087

Tableau 2 : Comparaison des valeurs des modules de Weibull obtenues avec les différentes approches et les valeurs des limites d'endurance avec V_{eff}^*

L'approche en V_{eff}^* ne permet pas de retrouver complètement les différents rapports $\bar{\Sigma}_{\infty} / \bar{\Sigma}_{\infty-ref}$. Lorsque le volume effectif équivalent V_{eff}^* est calculé à partir d'une autre contrainte que la contrainte principale σ_{xx} , le module de Weibull identifié est très différent, et les rapports identifiés également. Une perspective possible pour améliorer ce premier modèle est donc le développement d'une contrainte équivalente plus adaptée pour la détermination de la limite d'endurance moyenne à partir du volume effectif équivalent V_{eff}^* .

Un autre axe d'amélioration possible est la mise en place d'un seuil, dans la prise en compte des contraintes considérées dans les calculs des volumes effectifs équivalents V_{eff}^* , et donc la mise en place d'un modèle de Weibull à trois paramètres. En effet, avec le modèle à deux paramètres, sans seuil, la probabilité de rupture n'est jamais nulle, même pour une amplitude de chargement extrêmement faible.

4.4 Effet de la mise en place d'un seuil

Avec un seuil, la limite d'endurance moyenne et l'écart type s'écrivent

$$\bar{\Sigma}_{\infty} = \Sigma_s + S_0 \left(\frac{V_0}{V_{eff}} \right)^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (12)$$

$$\bar{\Sigma}_{\infty} = S_0 \left(\frac{V_0}{V_{eff}} \right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}. \quad (13)$$

Le module de Weibull m est fortement affecté par ce seuil. Les comparaisons se font donc par rapport à la dispersion obtenue après l'identification des différents modules. En considérant uniquement le volume de l'éprouvette sollicité au-dessus de la contrainte seuil Σ_s , le calcul du volume effectif équivalent V_{eff}^* devient

$$V_{eff}^*(m) = \Sigma_e \left(\frac{\sigma_e - \Sigma_s}{\sigma_{nom} - \Sigma_s} \right)^m V_e. \quad (14)$$

Le rapport des limites d'endurance est alors donné par

$$\frac{\bar{\Sigma}_{\infty} - \Sigma_s}{\bar{\Sigma}_{\infty ref} - \Sigma_s} = \left(\frac{V_{eff ref}^*(m)}{V_{eff}^*(m)} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (15)$$

Cette dernière relation permet d'obtenir le rapport $\bar{\Sigma}_{\infty} / \bar{\Sigma}_{\infty ref}$ pour la comparaison avec les données expérimentales

$$\frac{\bar{\Sigma}_{\infty}}{\bar{\Sigma}_{\infty ref}} = \Sigma_s + \left(1 - \frac{\Sigma_s}{\bar{\Sigma}_{\infty ref}} \right) \cdot \left(\frac{V_{eff ref}^*(m)}{V_{eff}^*(m)} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (16)$$

La figure 6 présente les résultats des volumes effectifs équivalents V_{eff}^* des quatre géométries d'éprouvettes obtenus avec deux seuils différents : $\Sigma_{s1} = 0,8 \bar{\Sigma}_{\infty ref}$ et $\Sigma_{s2} = 0,9 \bar{\Sigma}_{\infty ref}$

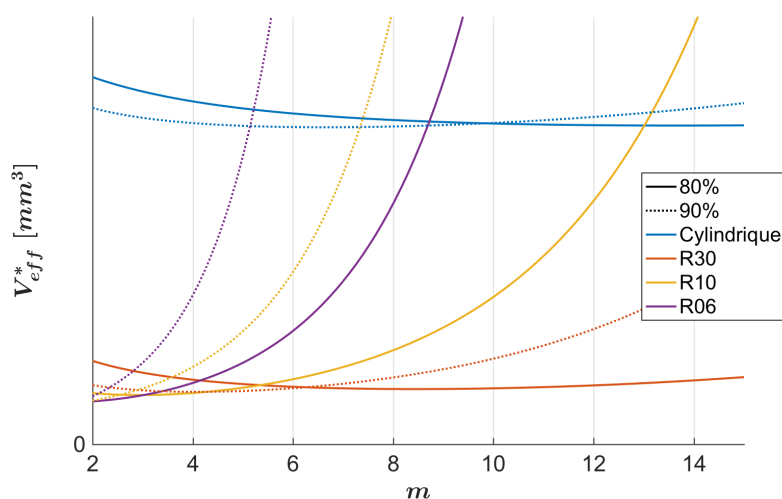


Figure 6 : Volumes effectifs équivalents V_{eff}^* avec seuils

Avec l'application d'un seuil, le volume effectif équivalent V_{eff}^* devient plus rapidement sensible à la concentration de contrainte, lorsque m augmente. On constate même que le volume effectif

équivalent de l'éprouvette cylindrique augmente de nouveau lorsque le seuil est à $0,9 \bar{\Sigma}_{\infty ref}$. Cela s'explique par les concentrations de contrainte situées à ses extrémités, au niveau des rayons de raccordement.

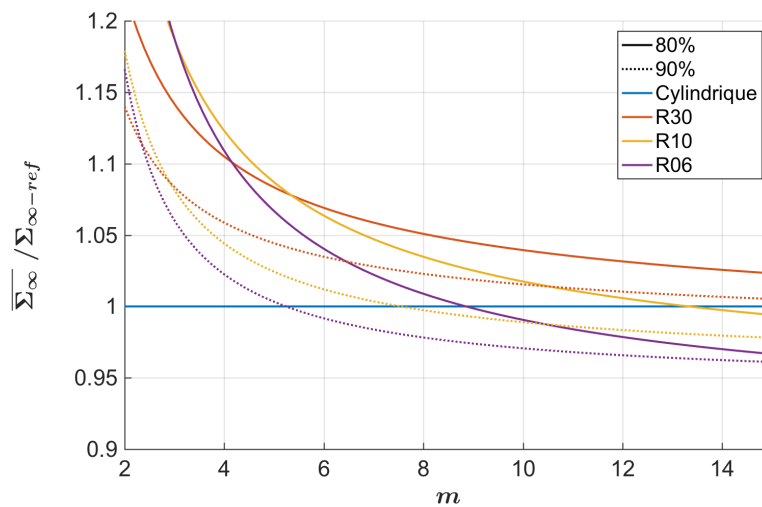


Figure 7 : Résultats sur les limites d'endurance avec l'approche V_{eff}^* avec seuils

De la même manière que précédemment, le module de Weibull est identifié pour minimiser les écarts sur les limites d'endurance à partir des résultats d'essais. Le tableau 3 reprend toutes les valeurs des modules de Weibull identifiés pour l'approche en V_{eff}^* , avec et sans seuil.

	m	CV	R30 : 1,077	R10 : 1,022	R06 : 0,984
$\Sigma_{s0} = 0$	39	0,032	1,046	1,028	0,993
$\Sigma_{s1} = 0,8 \bar{\Sigma}_{\infty ref}$	8,8	0,027	1,046	1,027	1,000
$\Sigma_{s2} = 0,9 \bar{\Sigma}_{\infty ref}$	4,9	0,023	1,046	1,026	1,005

Tableau 3 : Comparaison des différents modules de Weibull (avec seuils différents)

En comparant les tableaux 2 et 3, les différents coefficients de variation montrent que l'application d'un seuil ne suffit pas pour rendre compte à la fois de la dispersion observée par les essais de fatigue et à la fois des effets d'hétérogénéité de contrainte. En effet l'augmentation du seuil entraîne même une augmentation des écarts (avec des coefficients de variation plus faibles).

De plus, les valeurs des limites d'endurance moyenne identifiées semblent s'éloigner des résultats des essais de fatigue (notamment pour la géométrie avec le rayon de 6 mm). L'application d'un seuil et l'utilisation du modèle de Weibull à trois paramètres ne semblent donc pas adaptés à la prévision de la limite d'endurance pour ce type de problème.

5 Conclusion

Dans le modèle de Weibull, le paramètre m rend compte de la dispersion. Il intervient également dans le calcul du volume effectif, et donc dans la prise en compte des effets de volume et d'hétérogénéité de contrainte. De plus, la modélisation des courbes d'auto-échauffement proposé par Munier [2] permet d'identifier ce module à partir d'essais d'auto-échauffement. Ce lien avec la dispersion des essais en fatigue a été validé pour de nombreux matériaux [3]. Cela semble également être le cas du TA6V, où les coefficients de variation obtenus par dépouillement probabiliste des essais de fatigue et par analyse de la courbe d'auto-échauffement sont très proches. L'application du modèle de Weibull sur des éprouvettes entaillées, et donc sur des structures avec des volumes différents, des hétérogénéités de contrainte différentes, ainsi que des concentrations de contrainte inhérentes aux effets d'entailles, avait pour but de tester la pertinence de l'utilisation de ce modèle.

L'approche en V_{eff}^* présentée ici ne permet pas de rendre compte des variations des limites d'endurance moyenne pour les différentes géométries à partir d'un module de Weibull identifié par essais d'auto-échauffement par exemple. De plus, si le module de Weibull m est identifié pour minimiser les écarts avec les résultats expérimentaux, les valeurs obtenues sont proches des résultats des essais, mais une erreur subsiste et le module identifié ne rend plus compte de la dispersion.

Plusieurs axes d'amélioration sont possibles. Tout d'abord le développement d'une contrainte équivalente σ_{eq} plus favorable à la description des propriétés en fatigue, en prenant en compte le changement de l'état de contrainte au niveau de l'entaille par exemple. Une autre possibilité serait de considérer deux populations de défauts différents, une située en surface et une à cœur. En effet, pour les géométries entaillées, les points critiques se situent à la surface. L'éprouvette cylindrique de référence possède quant à elle un large volume sollicité de façon homogène. La modélisation de la seconde population de défaut en surface, avec un degré de nocivité différent, serait donc possible pour tenter d'améliorer le modèle présenté.

Références

- [1] Doudard, C. (2004). *Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombres de cycles à partir d'essais d'auto-échauffement*. Thèse de doctorat, ENS Cachan.
- [2] Munier, R. (2012). *Etude de la fatigue des aciers laminés à partir de l'auto-échauffement sous sollicitation cyclique : essais, observations, modélisation et influence d'une pré-déformation plastique*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale - Brest.
- [3] Munier, R. et al. (2014). *Determination of high cycle fatigue properties of a wide range of steel sheet grades from self-heating measurements*. International Journal of Fatigue, 63, 46-61.
- [4] Weibull, W. (1939). *A statistical theory of the strength of materials*. Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm.
- [5] Hild, F. (1992). *De la rupture des matériaux à comportement fragile*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.
- [6] Härkegård, G. (2010). *Assessment of methods for prediction of notch and size effects at the fatigue limit based on test data by Böhm and Magin*. International Journal of Fatigue, 32, 1701-1709.