

Membre de l'Université Paris Lumières

# Mengxiong ZHAO

## Ultrasonic Fatigue Study of Inconel 718

*Étude de la Fatigue Ultrasonique de l'Inconel 718*

Thèse présentée et soutenue publiquement le 11/09/2018  
en vue de l'obtention du doctorat de Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil  
de l'Université Paris Nanterre  
sous la direction de M. Olivier POLIT (Université Paris Nanterre)  
et de M. Emmanuel VALOT (Université Paris Nanterre)

### Jury :

Rapporteur	M. Jens BERGSTROM	Prof., Karlstadt University, Sweden
Rapporteur	M. Tiejing WU	Prof., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China
Examinatrice	Mme. Stéphanie SAILLY	Docteur, MECATEST, France
Examineur	M. Thierry PALIN-LUC	Prof., Arts et Métiers ParisTech, France
Examineur	M. Vincent BONNAND	Docteur, ONERA DMAS/MCE, France
Directeur	M. Olivier POLIT	Prof., Université Paris Nanterre, France
Codirecteur	M. Emmanuel VALOT	Ass.Prof., Université Paris Nanterre, France

# Résumé

L'Inconel 718 est utilisé dans de nombreuses industries, par exemple aéronautique et énergétique, notamment pour sa haute résistance à la corrosion, à l'oxydation, au fluage et sa haute résistance mécanique à très haute température. Le nombre total de cycles de ces composants mécaniques s'élève à  $10^9 \sim 10^{10}$  durant sa vie. Dans le contexte aéronautique, de nombreux travaux ont portés sur des chargements de grande amplitude à faible fréquence, comme les forces centrifuges ou les contraintes thermiques, en négligeant des chargements de faible amplitudes à très haute fréquence, du aux vibrations des pales.

Dans ce travail, on se propose d'étudier la fatigue à très grand nombre de cycles (VHCF) de l'Inconel 718 en utilisant des machines de fatigue ultrasonique, fonctionnant à 20 kHz. Le système d'acquisition utilise des cartes NI et le logiciel LabView pour superviser la fréquence, la température, les déplacements durant toute la durée des tests. Des capteurs laser Keyence utilisant deux sondes pour les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette permettent de capturer la fréquence et les modes de vibration. La différence entre les valeurs moyennes mesurées permet d'accéder à l'allongement de l'éprouvette, dû à l'auto-échauffement.

Trois types de matériaux avec différents traitements thermiques, AR, DA et DAHQ de l'ONERA sont comparés. La différence au niveau de la taille de grain, de la phase, des précipités, ... est analysée par micrographie métallographique en utilisant un microscope optique (MO) et un microscope électronique à balayage (MEB). Le comportement en traction quasi-statique et sous chargement cyclique contrainte-déformation est aussi proposé. La transition entre durcissement et adoucissement cyclique apparait à l'issue du traitement thermique. Finalement, les surfaces de ruptures sont observées en utilisant des caméras optiques et un MEB afin d'identifier les mécanismes de ruptures de l'Inconel 718 dans le domaine de la fatigue à très grand nombre de cycles.

**Mots-Clés:** Fatigue à très grand nombre de cycles; Ultrasonique; Inconel 718; Traitement thermique; Auto-échauffement

# Introduction

Avec le développement de l'industrie moderne, le cycle total des composants mécaniques a déjà atteint  $10^9 \sim 10^{10}$  pendant toute sa durée de vie. Le moteur d'avion est un exemple du système mécanique le plus avancé, avec cinq composants principaux: admission, compresseur, chambre de combustion, turbine et buse. Le compresseur d'admission et le compresseur basse pression ont fonctionné à la température ambiante normale, mais le compresseur haute pression, la chambre de combustion, la pale et le disque de turbine ont subi une température très élevée, en particulier pour les disques de turbine. La bride du disque de turbine a généralement supporté  $550 \sim 750^\circ\text{C}$ , tandis que la température au centre du disque est d'environ  $300^\circ\text{C}$ .

Le superalliage à haute température est largement utilisé dans les applications aéronautiques, en raison de sa haute résistance à la corrosion, à l'oxydation, à la déformation par fluage thermique et à la résistance mécanique élevée à température élevée même. La variété de superalliage est toujours appliquée ensemble en même temps, en fonction des différents types d'exigences au niveau des différentes parties du moteur. La masse totale du superalliage atteint 40 à 60% dans le moteur développé et a occupé la position irremplaçable dans l'industrie aéronautique.

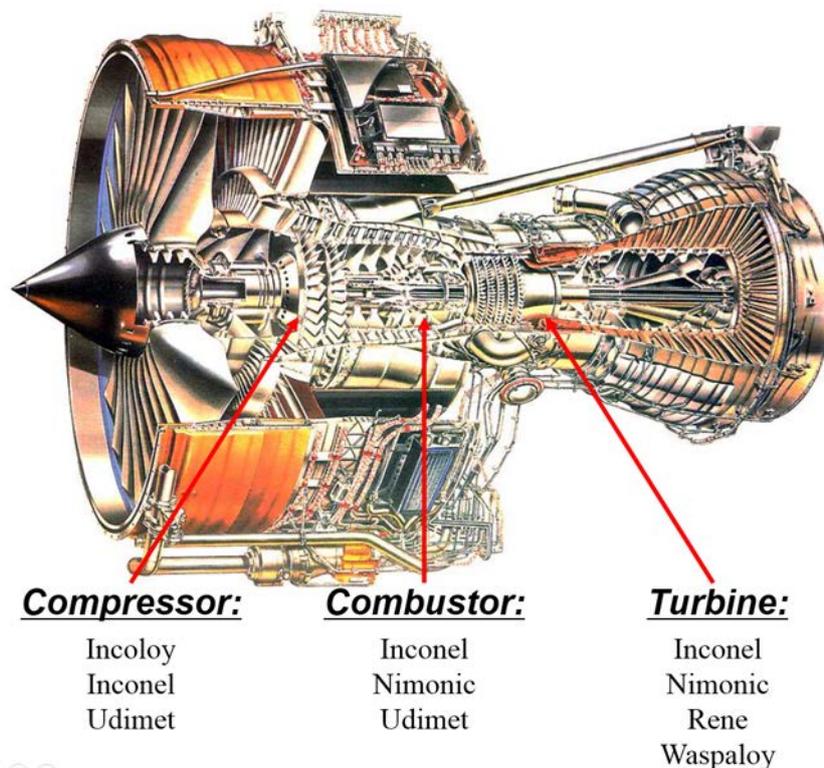


Figure 1 Superalliage Haute Température Utilisé dans le Moteur d'Avion

Le disque de turbine subit une charge basse fréquence de grande amplitude, comprenant principalement: une force centrifuge provoquée par une vitesse de rotation élevée, une contrainte thermique provoquée par un gradient de température élevé, une force de traction transmise par une lame rotative, etc. Le cycle de chargement de ces forces est identique au cycle de travail de l'avion.

Et il supporte également les charges haute fréquence de faible amplitude provenant de la vibration de la lame pendant tout le traitement, en particulier dans les situations instables de décollage et d'atterrissage.

L'accident aéronautique induit par une défaillance de la structure est courant. L'importance des essais expérimentaux et de la prévision précise de la durée de vie des turbines peut être illustrée par l'accident survenu à Los Angeles en 2006. Le moteur gauche de l'avion Boeing 767 a explosé lors d'une course au sol de grande puissance. L'enquête a montré que le disque de turbine du premier étage était tombé d'une fissure de fatigue intergranulaire. "Un morceau de disque qui a initialement rebondi sur le sol avant de pénétrer dans l'avion a complètement coupé la poutre de genou gauche de l'avion et s'est partiellement sectionnée, la poutre droite avant de quitter l'avion".

Par conséquent, pour assurer la fiabilité et la sécurité de la structure, la recherche sur les comportements de fatigue à très haut cycle (VHCF) revêt une grande importance.

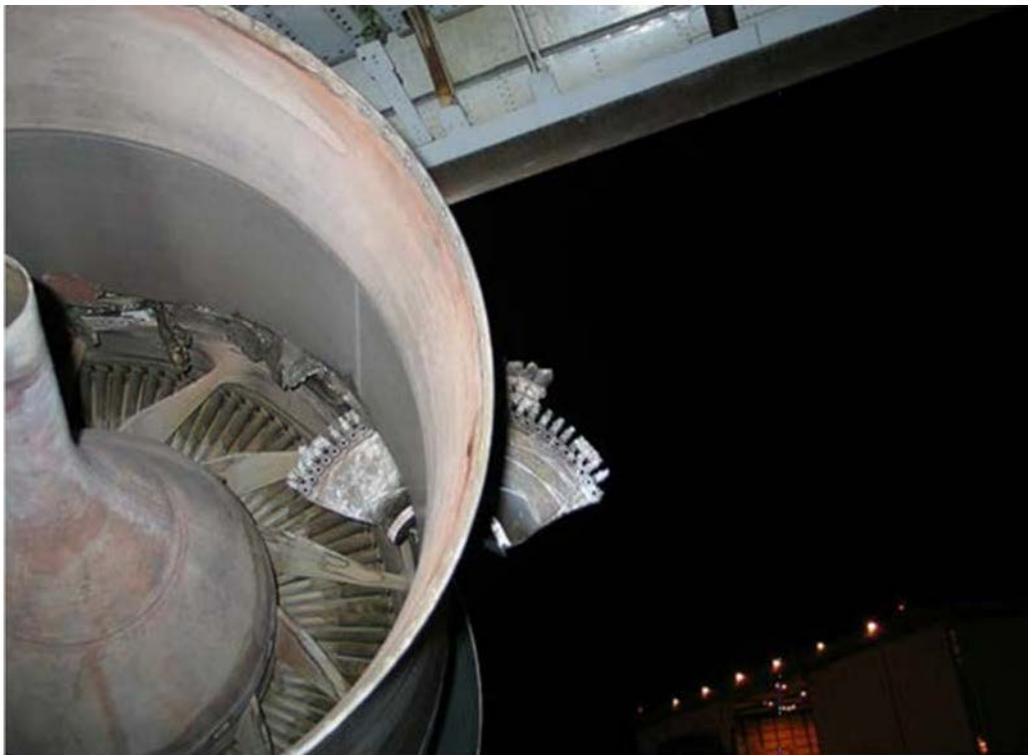


Figure 2 Échec du Disque de Turbine dans l'Accident de Moteur à Los Angeles

# Dispositifs Expérimentaux

La procédure expérimentale habituelle pour déterminer la résistance à la fatigue consiste à tester un certain nombre d'échantillons similaires, en soumettant chacun à une charge alternative particulière jusqu'à ce qu'elle tombe en panne.

Les machines d'essai de fatigue peuvent être classées selon le type de mode de chargement appliqué à l'échantillon. Il s'agit d'une contrainte directe ou axiale, d'une flexion rotative, d'une flexion, d'une torsion et d'une contrainte multiaxiale combinée.

Il est également divisé par le type de fréquence de chargement que le chargement mécanique conventionnel avec basse fréquence 0.1~50 Hz, machine hydraulique ou pneumatique fonctionnant jusqu'à 200 Hz, et la charge électromagnétique ultrasonique à 20 ou 30 kHz.

Les tests de fatigue classiques fonctionnent généralement à la fréquence du système de charge de la machine d'essai. Ceci est toujours effectué sous la condition de vibration de force. Dans la machine de test de fatigue par ultrasons, la fréquence excitée fournie par la machine d'essai doit être l'une des fréquences propres de l'échantillon, et traite des vibrations libres. Seule une des extrémités de l'échantillon doit s'agglomérer à la machine de test, l'autre est considérée comme libre. La distribution des contraintes ou des déformations des tests est absolument symétrique  $R = -1$ . On suppose que les matériaux sont isotropes et homogènes et qu'ils ont un comportement élastique pendant toute la durée du chargement cyclique.

De plus, la machine de contrôle par ultrasons était capable d'effectuer une compression de tension longitudinale juste avant. Avec le développement de l'équipement d'essai de fatigue, l'unité à ultrasons peut également se combiner dans la machine de traction pour obtenir une contrainte moyenne statique préétablie, réalisant le test de charge asymétrique  $R > -1$ , y compris l'essai de tension-tension.

## Groupe de Test en Piézocéramique de Compression et Tension:

Le schéma de principe des équipements de test VHCF est illustré à la figure en bas. Les principaux composants de ce groupe de systèmes peuvent être résumés en trois parties:

1. Système de Contrôle:

Ordinateur avec carte interne PCI et logiciel d'auto-programmation National Instrument qui permettent de contrôler les paramètres initiaux.

2. Système d'Activation:

Le générateur de puissance, le convertisseur piézoélectrique et l'amplificateur / le cornet appliquent le déplacement disponible d'un côté de l'échantillon à sa fréquence propre pour obtenir l'amplitude de déformation requise correspondant à la contrainte dans la partie centrale de l'échantillon.

3. Système d'Acquisition:

La carte externe NI pilotée par LabView combine les signaux de Branson, du capteur laser Keyence et de la caméra infrarouge Flir, en surveillant la fréquence, la température, le déplacement, etc. pour l'ensemble du test.

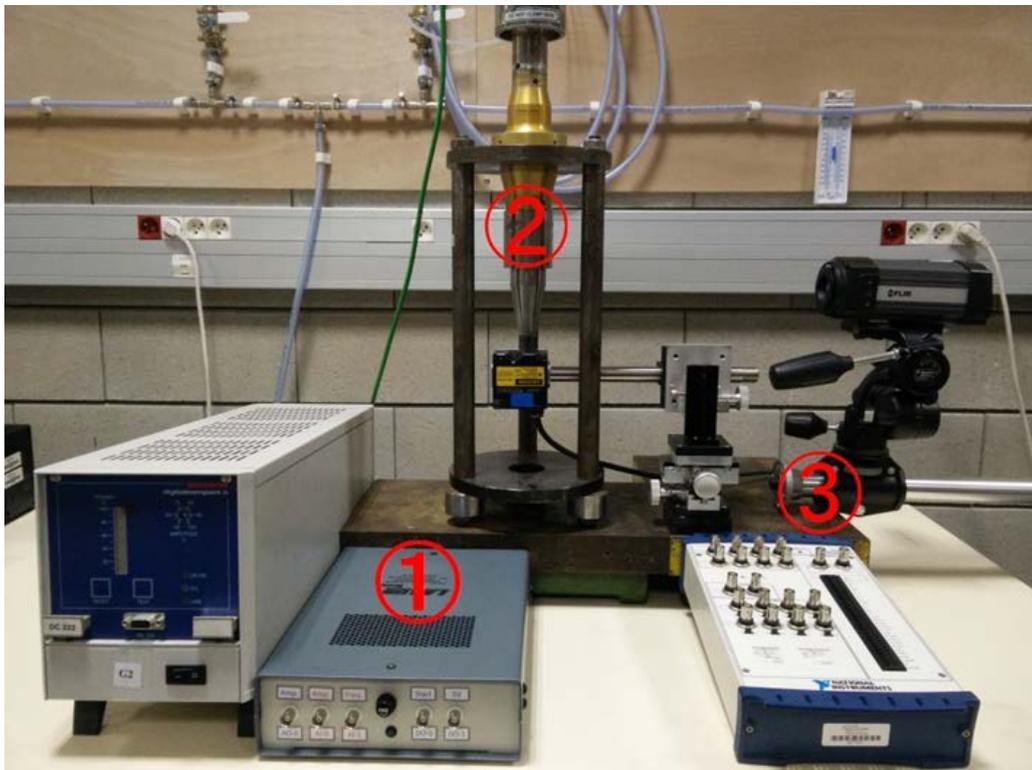


Figure 3 Groupe de Test de Compression et Tension VHCF

## Systeme de Contrôle:

Le test de fatigue par ultrasons VHCF est contrôlé par déplacement. Afin de contrôler la machine, un ordinateur personnel avec une carte PCIe interne de National Instrument® et un logiciel d'auto-programmation fonctionnant sous Windows sont utilisés. Le logiciel permet d'imposer le signal électrique pour commander l'amplitude, de le comparer et de l'ajuster avec le retour d'information du système vibré mécaniquement et de modifier la valeur si nécessaire.

Deux signaux doivent être choisis pour entrer dans le système d'actionnement: l'un numérique sur le relais pour démarrer ou arrêter le test et l'autre analogique pour déterminer l'amplitude du déplacement. Le courant électrique de ce signal analogique est proche de 100~150 mA, ce qui signifie que la carte USB portable NI ne peut pas fournir suffisamment d'énergie, il est préférable d'utiliser l'édition PCI.

La fréquence n'est pas contrôlée par le réglage, mais choisie automatiquement par le logiciel Branson® UPS™, en fonction de la consommation totale d'énergie minimale, ainsi que du courant minimum (rouge). L'amplitude du déplacement garde le maximum (vert) et la phase change également (noir). Peu importe le balayage vers l'avant ou vers l'arrière, cette fréquence affiche la même valeur, comme illustré à la figure.

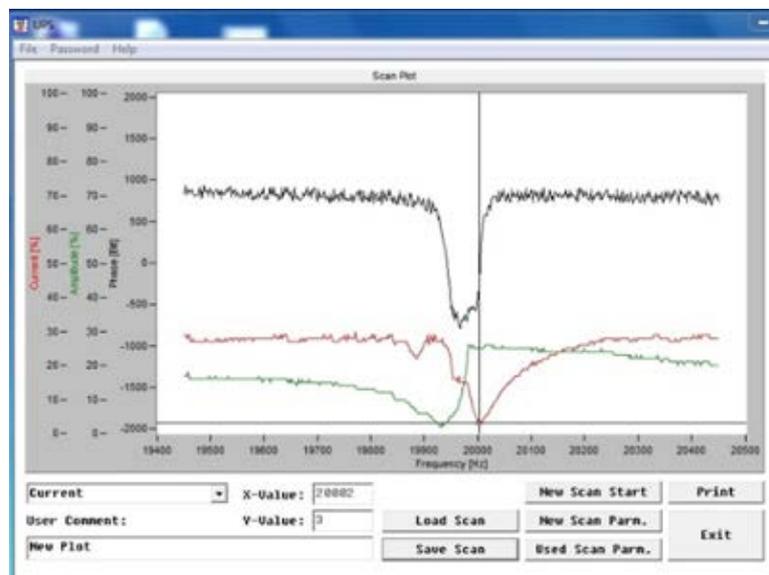


Figure 4 Balayage de Fréquence par Logiciel Branson UPS

## Systeme d'Activation:

Le schéma de principe du système d'actionnement est illustré à la figure. Deux courbes sont dessinées pour afficher l'amplitude de contrainte et de déplacement sur différentes parties.

- Générateur de Courant:

Le générateur de puissance reçoit le signal de contrôle ( $\approx 100\text{mA}$ ) de la carte NI et génère un signal électrique sinusoïdal à partir d'électricité civile 50 ~ 60Hz à la fréquence de la nature du système de près de 20 kHz.

- Convertisseur Piézoélectrique:

Le convertisseur piézoélectrique est excité par le générateur de puissance et transforme l'énergie électrique en une onde de vibration mécanique longitudinale à ultrasons mécanique à la même fréquence. L'amplitude de l'onde directement de la piézo-céramique est petite. Il y a deux signaux de retour du convertisseur, l'un pour l'amplitude et l'autre pour la fréquence.

- Sonotrode:

Le rôle du booster est de fournir un plan pour organiser l'ensemble du groupe, tout en augmentant un peu l'amplitude de l'onde. En raison de la faible amplitude de vibration de la céramique piézoélectrique, le cornet (également appelé sonotrode) est nécessaire pour amplifier cette valeur de quelques microns à dixièmes de micron, disponible pour la contrainte et l'amplitude requise dans la section de test.

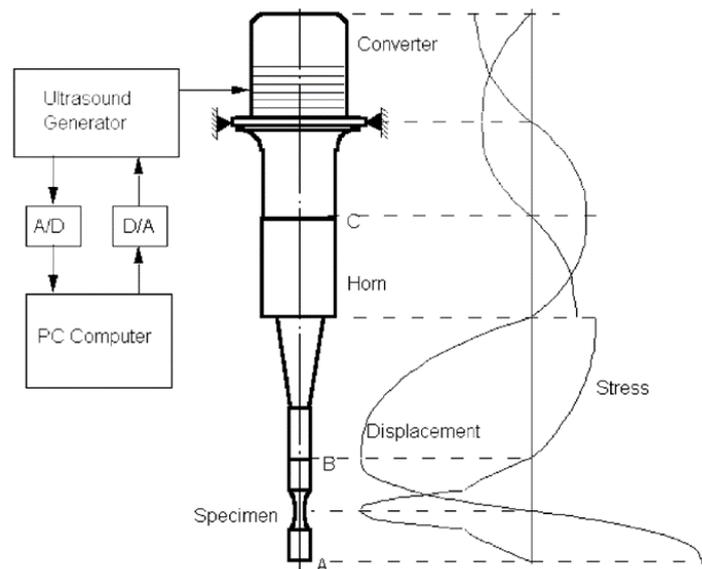


Figure 5 Schéma du Système d'Actionnement avec de Contrainte et Déplacement

## Systeme d'Acquisition:

Le capteur laser et la caméra infrarouge sont utilisés pour mesurer et analyser le mode de vibration, la déformation, la prolongation, la température due au phénomène d'auto-échauffement, etc.

Deux sondes de capteur laser sont utilisées en même temps pour révéler le mode de vibration de l'échantillon. L'un est placé au bas de l'échantillon, l'autre est placé au bas du cornet. La surface inférieure de la corne et la surface supérieure de l'échantillon ont été considérées avec la même situation de vibration. La sonde supérieure est tournée de près de 30° à cause de l'obstacle géométrique. Après l'étalonnage expérimental converti, il peut être utilisé normalement.

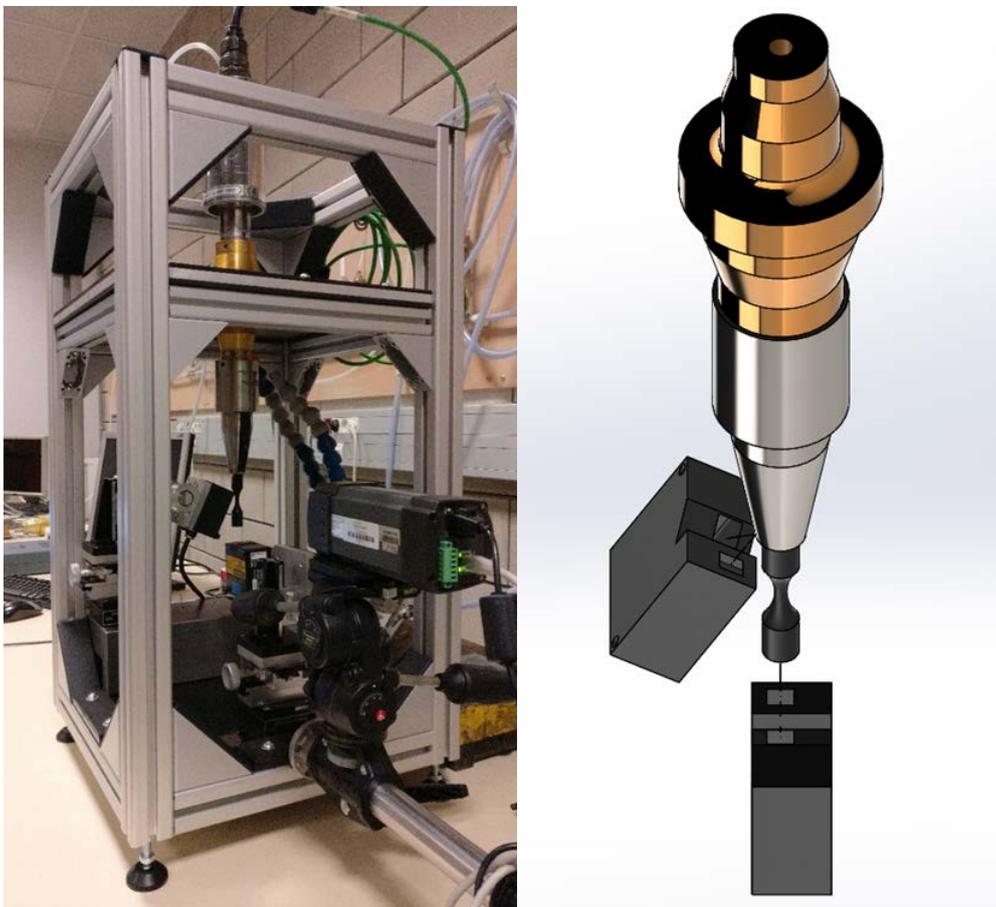


Figure 6 Schéma du Système d'Acquisition

Le capteur de la série Keyence® LK-G5001P avec deux sondes LK-H022 est utilisé pour le test. La fréquence maximale détectée est de 392 kHz. Alors que pendant l'application pratique, 200 kHz sont généralement utilisés en tenant compte de la précision et de la consommation de mémoire. Pour les vibrations mesurées près de 20 kHz, il y a 10 points pour la description d'une onde sinusoïdale en moyenne.

Le capteur laser est vérifié au micromètre avec une précision de 0,005 mm. Deux groupes de données provenant du logiciel du capteur et de l'écran micrométrique peuvent être obtenus en tournant le cliquet en continu. Un bon accord signifie que la sonde de détection laser avec le dispositif actuel est adaptée au test de fatigue.

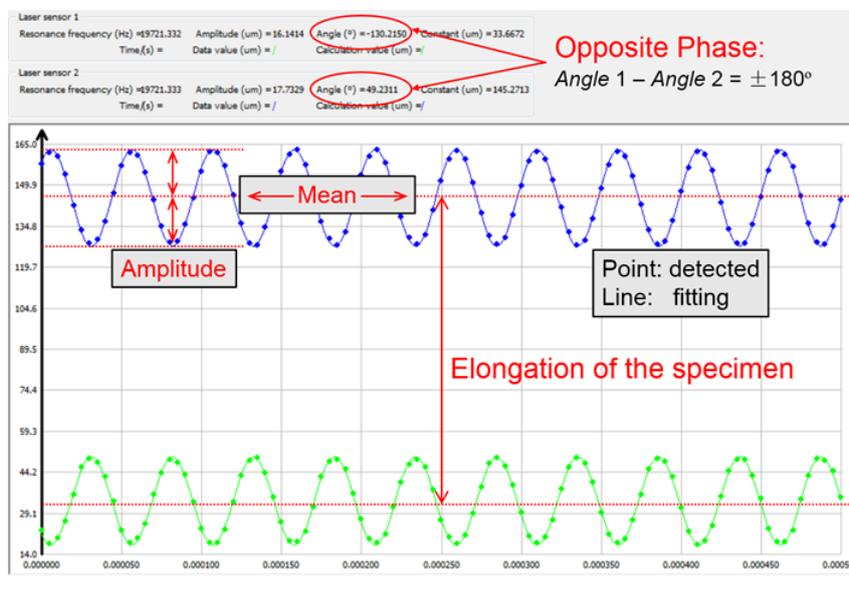


Figure 7 Onde Originale Obtenue à Partir d'un Capteur Laser

La fréquence de résonance de l'onde détectée est traitée comme la fréquence de la composante dont l'amplitude maximale est indiquée. Il peut être comparé à une autre fréquence de la tension de retour sur la céramique. Selon les recherches précédentes, la différence maximale entre ces deux valeurs ne dépasse pas 50 Hz, moins de 1%.

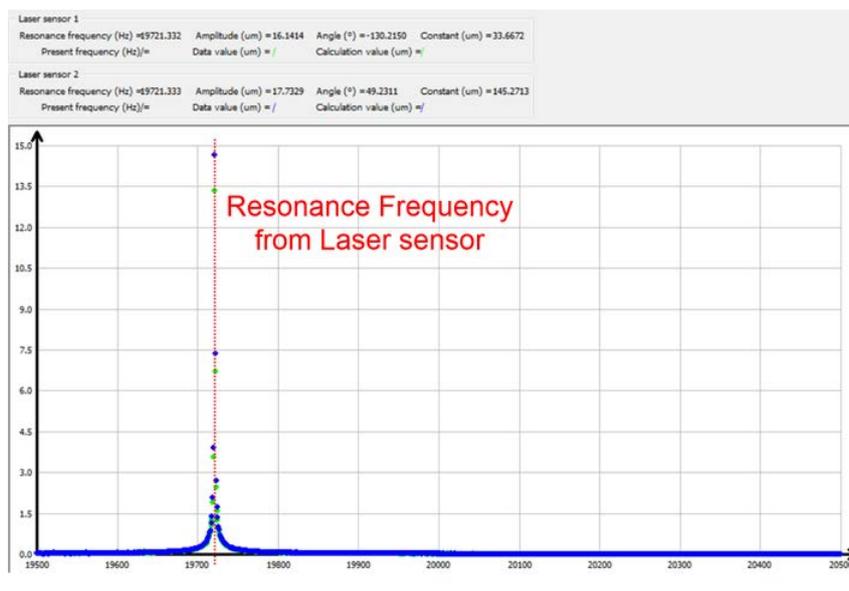


Figure 8 Fréquence Calculée à Partir d'un Capteur Laser par FFT

La caméra infrarouge Flir® A325sc est choisie pour le test. La plage de travail de la bande spectrale est de 7.5~13  $\mu\text{m}$  et la résolution de cette caméra est de 320\*240 pixels. Il y a deux plages de température par défaut qui peuvent être choisies, -20~+120 ou 0 ~ 360°C.

La précision de cette caméra est de  $\pm 2^\circ\text{C}$  ou 2% de la valeur détectée, ce qui est suffisant pour la recherche sur la fatigue compte tenu du prix. La caméra est également vérifiée par notre propre laboratoire. Le matériel d'essai en vrac peint en noir a été placé dans le grand appareil de chauffage avec une grande précision. La valeur détectée par la caméra infrarouge est vraiment proche de la température de chauffage à la demande. Cela signifie que l'Inconel 718 avec la peinture noire actuelle convient à la mesure sans contact par caméra infrarouge.

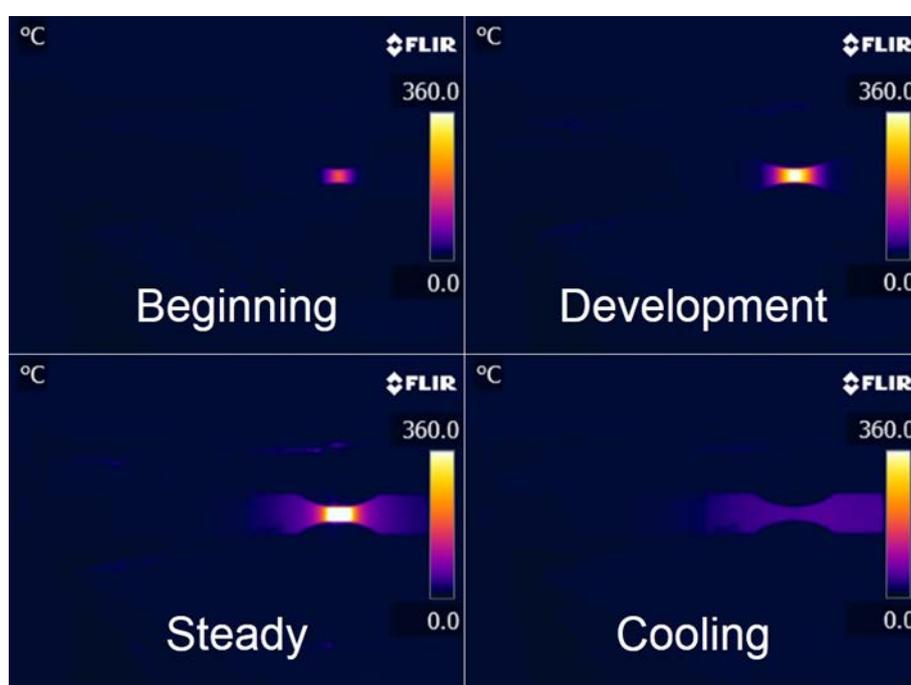


Figure 9 Répartition de la Température en Fonction du Cycle

Outre la température maximale de toutes les images affichées dans le résumé, tous les points qui se trouvent face à la caméra ont également été enregistrés, comme illustré à la figure 2.14. La chaleur génère principalement dans la section de test au début de l'essai, puis conduit progressivement à travers l'échantillon jusqu'à la distribution stable avec l'équilibre entre la production de chaleur et la dissipation de tous les échantillons. L'énorme chaleur s'échappe dans le point de rupture (non représenté sur la figure, la limite de détection est de 360 ° C) et la température diminue jusqu'à la température ambiante après l'arrêt de la machine causé par la rupture de l'échantillon.

Pour la sécurité de la céramique piézoélectrique, deux pistolets de refroidissement sont généralement utilisés entre le klaxon et l'amplificateur. Même s'ils sont éloignés de l'échantillon, la température de l'échantillon n'est pas totalement symétrique, comme le montre la figure.

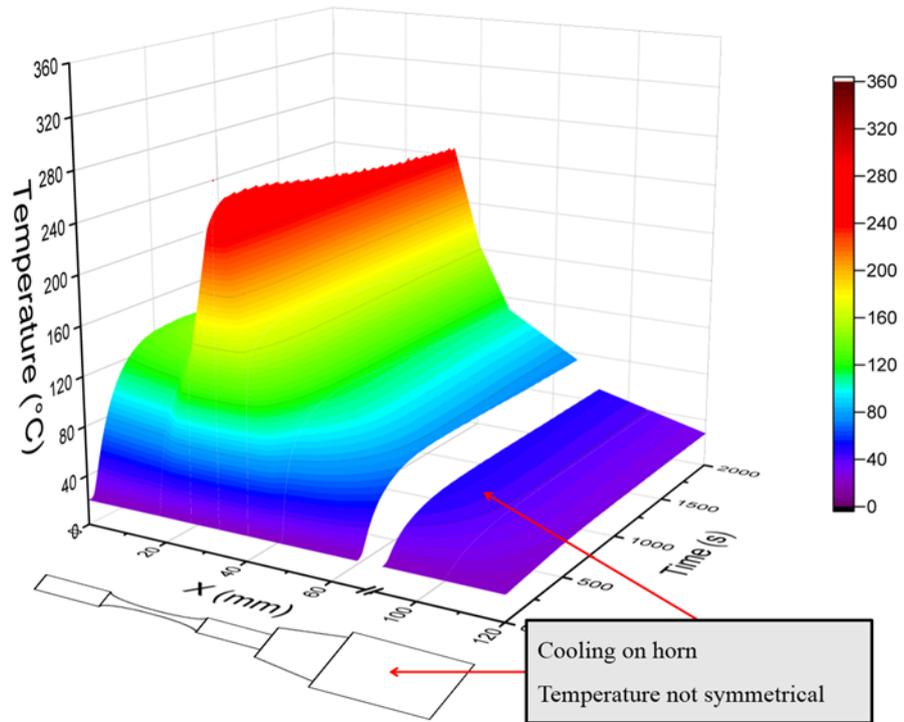


Figure 10 Répartition de la Température en Fonction du Cycle

## Conception des Echantillons – Calculation:

Pour les éprouvettes de fatigue à section variable, l'aire de coupe n'est pas constante mais varie le long de la direction axiale  $S=S(x)$ .

$$\rho S(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial F(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ E_d S(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right]$$

Pour l'onde stationnaire harmonique pendant l'essai de fatigue, le déplacement de l'échantillon peut être écrit comme suit:

$$u(x,t) = u(x) e^{i\omega t}$$

Alors l'équation différentielle pourrait être simplifiée comme:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \frac{S'(x)}{S(x)} \frac{\partial u(x)}{\partial x} - \frac{\omega^2}{E_d/\rho} u(x) = 0$$

suppose que

$$\kappa = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{\sqrt{E_d/\rho}}$$

C'est l'équation différentielle simplifiée de l'onde mécanique longitudinale et plane pour l'échantillon à section variable.

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \frac{S'(x)}{S(x)} \frac{\partial u(x)}{\partial x} - \kappa^2 u(x) = 0$$

La géométrie des éprouvettes en fatigue vibratoire VHCF est généralement conçue avec un profil axisymétrique en verre d'heure, en raison du coefficient d'amplification de contrainte plus important généré par la forme en sablier et de la contrainte maximale stabilisée dans la section médiane.

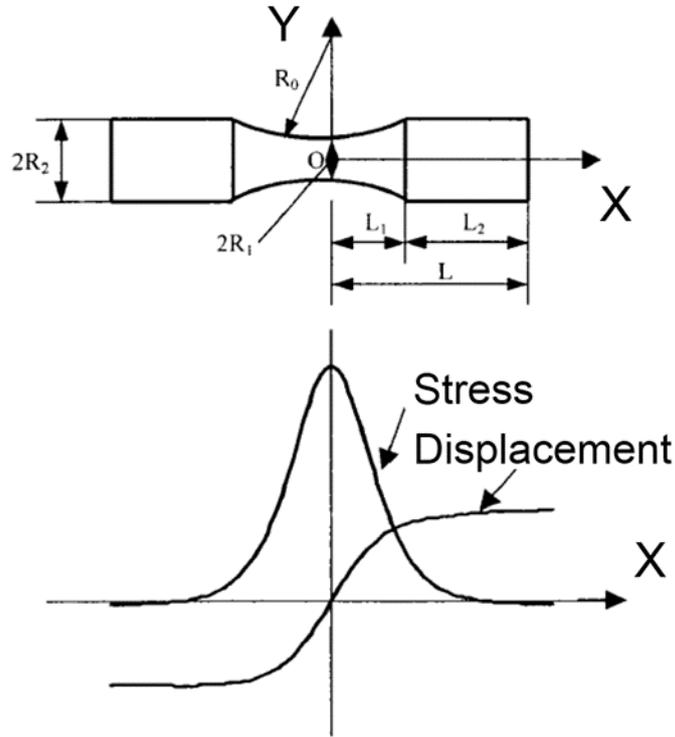


Figure 11 Déplacement et Répartition du Stress dans les Echantillons de Sablier

Pour faciliter le traitement de fabrication, la section réduite au milieu de l'échantillon est traitée comme un arc de cercle, le diamètre peut être écrit comme suit:

$$R_0 = \frac{(R_2 - R_1)^2 + L_1^2}{2(R_2 - R_1)}$$

La longueur de résonance de l'échantillon est définie comme:

$$L_2 = \frac{1}{\kappa} \tan^{-1} \left[ \frac{\beta \coth(\beta L_1) - \alpha \tanh(\alpha L_1)}{\kappa} \right]$$

afin que

$$\alpha = \frac{1}{L_1} \cosh^{-1} \frac{R_2}{R_1} \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - \kappa^2}$$

Semblable à la dernière barre de cylindre, aux deux extrémités du spécimen en forme de sablier, le déplacement est maximal, la contrainte disparaît à  $x=L_1+L_2$ .

$$u_{\max} = A_0 \quad \sigma = 0$$

Le déplacement disparaît et le stress atteint son maximum au milieu de l'échantillon lorsque  $x=0$ :

$$u = 0 \quad \sigma_{\max} = -\beta A_0 E_d \frac{\cos(\kappa L_2) \times \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\beta L_1)}$$

Le coefficient d'amplitude de stress peut être défini comme:

$$C_s = \left| \frac{\sigma_{\max}}{u_{\max}} \right| = \beta E_d \frac{\cos(\kappa L_2) \times \cosh(\alpha L_1)}{\sinh(\beta L_1)}$$

## Conception des Échantillons – Simulation:

Simulation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis Le logiciel FEM ANSYS est également utilisé pour la validation de la fréquence de résonance de tout le groupe et du coefficient d'amplitude de contrainte de l'échantillon. Le modèle pourrait être simplifié en deux dimensions car la géométrie de toutes les pièces est axisymétrique. Dans le même temps, ce résultat est comparé à celui obtenu en trois dimensions.

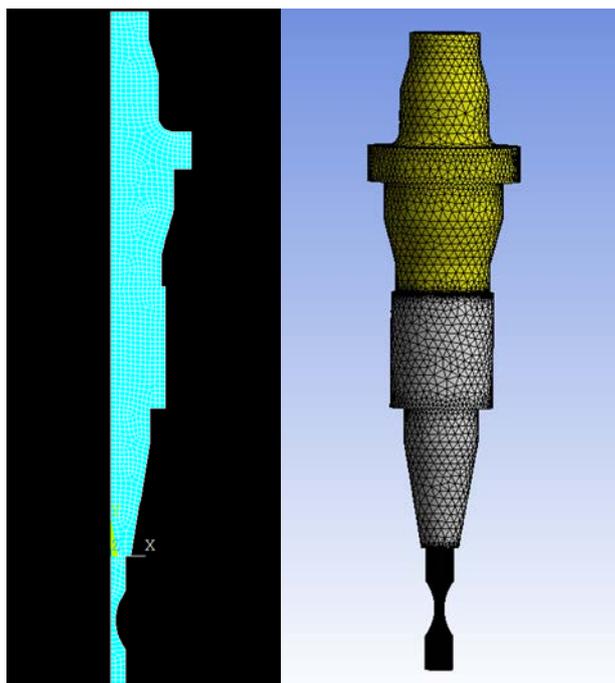


Figure 12 Modèle de Assemblage avec Échantillon

Des analyses modales et harmoniques sont effectuées pour toutes les parties séparées (Booster / Sonotrode / Cylinder / Specimen) et deux types d'assemblage (sans / avec échantillon). La fréquence excitée n'a pas été définie par l'utilisateur, mais choisie automatiquement par le logiciel Branson UPS, en fonction de la consommation totale minimale d'énergie et du courant minimum. Cela signifie que le spécimen ne vibre pas toujours naturellement, mais sous une vibration forcée à la fréquence appropriée pour tous les groupes.

Le résultat de la simulation pour pièce séparée est présenté dans le tableau. Il n'y a pas de données expérimentales dans ce tableau, car il est difficile de mesurer la fréquence de la nature de chaque partie séparément. Toute la fréquence et le coefficient de cette table sont en mode de compression de première tension. La différence entre APDL 2D et Workbench 3D est de 20 Hz.

### Auto-Echauffement:

L'auto-échauffement de l'échantillon est significatif pendant le test, causé par la fiction interne sous un taux de déformation élevé. La température dans la section d'essai de l'échantillon est supérieure à 100 ° C, tandis qu'elle est relativement basse à deux extrémités. La fréquence de la nature a diminué de plusieurs centaines de Hz, en raison de la diminution du module. La simulation numérique est effectuée pour la validation de la fréquence de résonance et du coefficient de contrainte-amplitude de l'échantillon.

Pour simplifier le traitement du calcul, l'échantillon est traité comme 7 tranches dans lesquelles la distribution de température est homogène. La longueur de ces tranches est une asymétrie par rapport à la section de test, illustrée à la figure. En raison de la présence d'air de refroidissement entre le booster et la sonotrode, la température en haut et en bas de l'échantillon n'est pas totalement asymétrique.

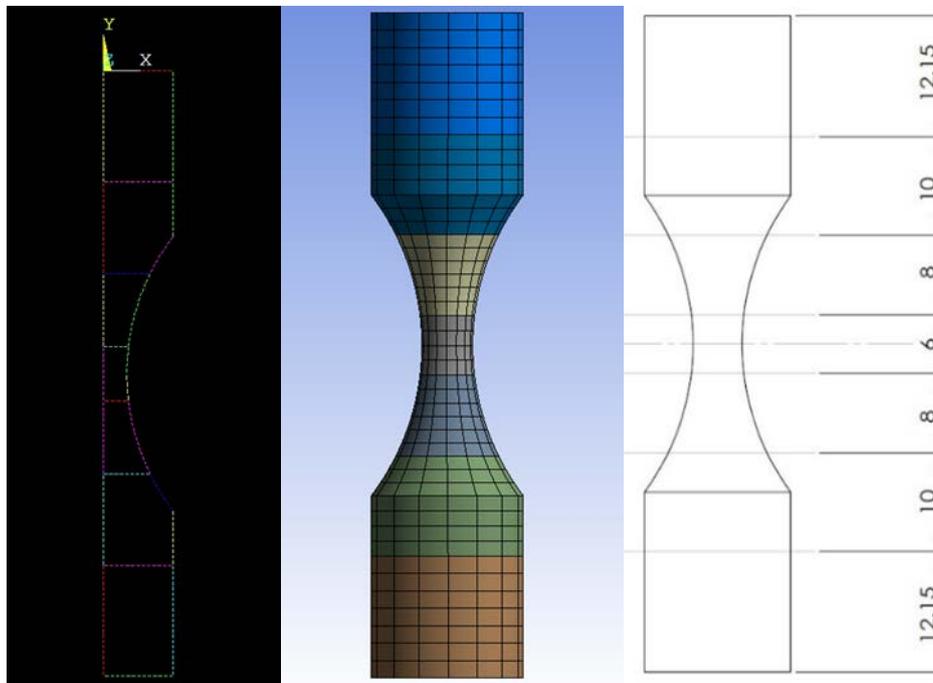


Figure 13 Modèle Tranché de Échantillon avec Auto-Echauffement

Il est nécessaire de souligner que la fréquence minimale de l'échantillon chauffé se produit au début de l'essai, et non jusqu'à une situation stable. La chaleur génère principalement à partir du milieu de la section de test en raison de l'amplitude de contrainte élevée, puis est transférée aux extrémités de l'échantillon. Le traitement de la génération de chaleur est plus rapide que la conduction, l'énergie s'accumule à ce moment. La température maximale du "développement" est de 272°C, alors que après "stable", elle est de seulement 226°C. Par conséquent, le minimum de fréquence de simulation se produit également avant stabilisation.

# Propriétés des Matériaux

Avant le test de fatigue par ultrasons, les propriétés physiques, les comportements monotones et cycliques de l'Inconel 718 sont validés dans ce chapitre. La micrographie de l'échantillon métallographique est prise en utilisant OM et SEM, pour étudier en détail la différence de taille de grain, de phase, de particule de précipité, etc.

## Densité:

Selon les calculs théoriques et les simulations numériques du dernier chapitre, les propriétés matérielles les plus importantes pour la résonance sont la densité, le module de Young et le coefficient de Poisson. La masse et le volume de l'échantillon restent constants après le traitement, de sorte que le traitement thermique n'influence pas la densité. La densité de tous les spécimens est dans cette gamme:

$$\rho_{spe} = \frac{m}{V} = \frac{64.14 \sim 64.32 \times 10^{-3}}{7.852 \times 10^{-6}} = 8168.6 \sim 8191.5 \text{ kg/m}^3$$

## Traitement Thermique:

Inconel 718 est généralement acheté sous forme de pièce forgée recuite, de billette, de barre, de plaque et de condition de détente. Ensuite, ce matériau est fabriqué dans son état le plus malléable. Après la fabrication, il pourrait être traité thermiquement selon les spécifications applicables.

Pour la plupart des applications, l'alliage Inconel 718 est utilisé sous cette forme: solution recuite et durcie par précipitation (vieilles). Cet alliage est durci par précipitation de phases secondaires (par exemple,  $\gamma'$  et  $\gamma''$ ) dans la matrice métallique. La précipitation de ces phases de nickel (aluminium / titane, niobium) est induite par traitement thermique dans la plage de températures de 593 à 816°C. Pour que cette réaction métallurgique se déroule correctement, les constituants de vieillissement doivent être en solution (dissous dans la matrice).

## Microstructure après Traitement Thermique Agé:

Le diagramme TTT (Time Temperature Transformation) de l'Inconel 718 est présenté dans la figure. La température DRX (recristallisation dynamique) est d'environ 950°C et les grains commencent à croître à plus de 1035°C.

Du point de vue de la phase cristalline, le traitement thermique vieilli à 720 °C jusqu'à 8 heures ne pouvait influencer que la phase  $\gamma'$  qui ne peut être observée par MEB. L'analyse de la micrographie ne peut se concentrer que sur la structure, plutôt que sur la phase d'alliage.

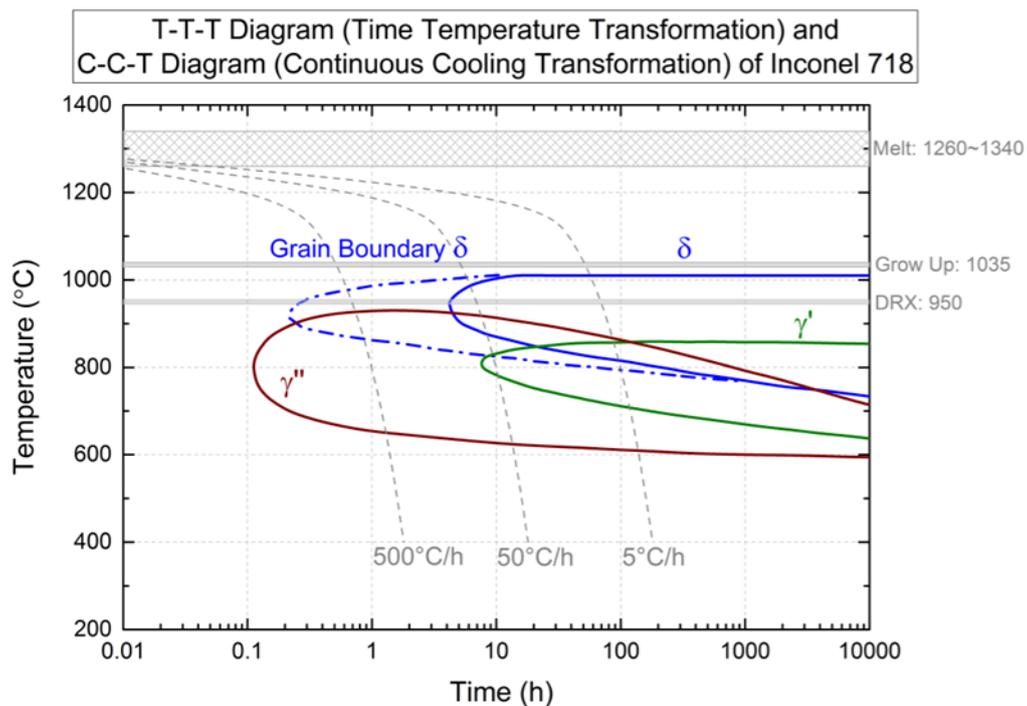


Figure 14 Diagramme de Précipitation des Différentes Phases d'Inconel 718

La phase orthorhombique non renforcée  $\delta$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) est incohérente avec la matrice  $\gamma$ . Globularité / forme lenticulaire  $\delta$  distribue dans la matrice FCC. Aiguille-plaquette / forme lamellaire  $\delta$  nucléée dans le joint de grain. Il est utilisé pour contrôler la taille des grains dans le matériau corroyé et semble également important pour la ductilité de l'entaille.

Les carbures et les nitrures sont également importants pour le superalliage, qui fournit un certain degré de renforcement de la matrice pour obtenir des propriétés de résistance optimales et pour le contrôle de la taille des grains.

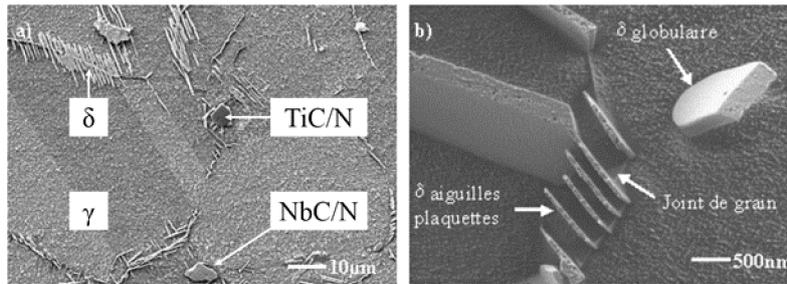


Figure 15 Phase  $\delta$  dans l'Inconel 718

La figure illustre l'imagerie EDS de la matrice de base Inconel 718. La zone mesurée se combine avec les phases  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$ , sans particules de précipitation. La composition chimique est représentative de l'ensemble des 3 ensembles de matériaux (tel que reçu, directement âgé, DAHQ).

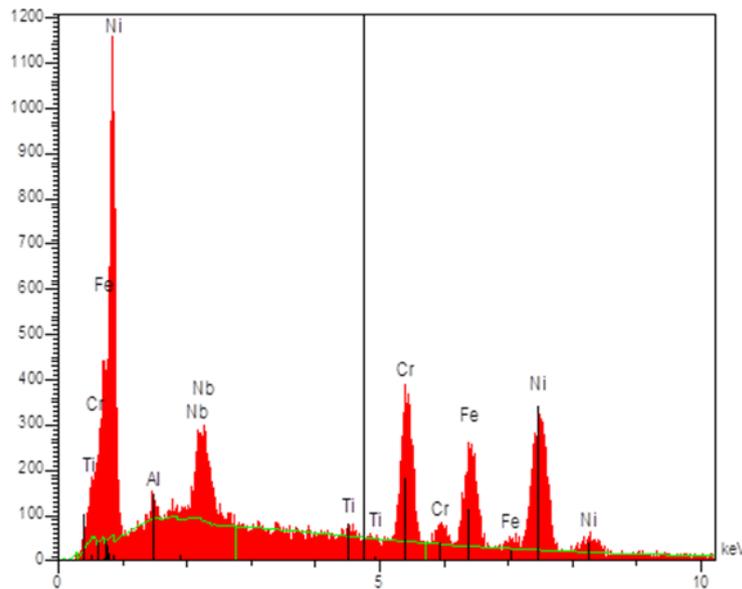


Figure 16 EDS Analyse de la Matrice de Base Inconel 718

La micrographie optique de l'échantillon métallographique Inconel 718 est présentée à la figure. La caractéristique la plus évidente et la plus importante de ce matériau est hétérogène. Il contient plusieurs "bandes de grain fin" (b) et beaucoup de grains plus gros "non-recristallisés" (c / d). Chaque bande est constituée d'une grande quantité de grains fins allant jusqu'à des centaines, tandis que la longueur totale de ces grains est encore inférieure à celle d'un grain non recristallisé ( $> 100 \mu\text{m}$ ). En d'autres termes, la longueur du plus gros grain est plus de 100 fois supérieure à la plus petite. Ce niveau d'hétérogénéité entraîne des dommages importants sur les propriétés mécaniques, en particulier pour la fatigue à haute fréquence.

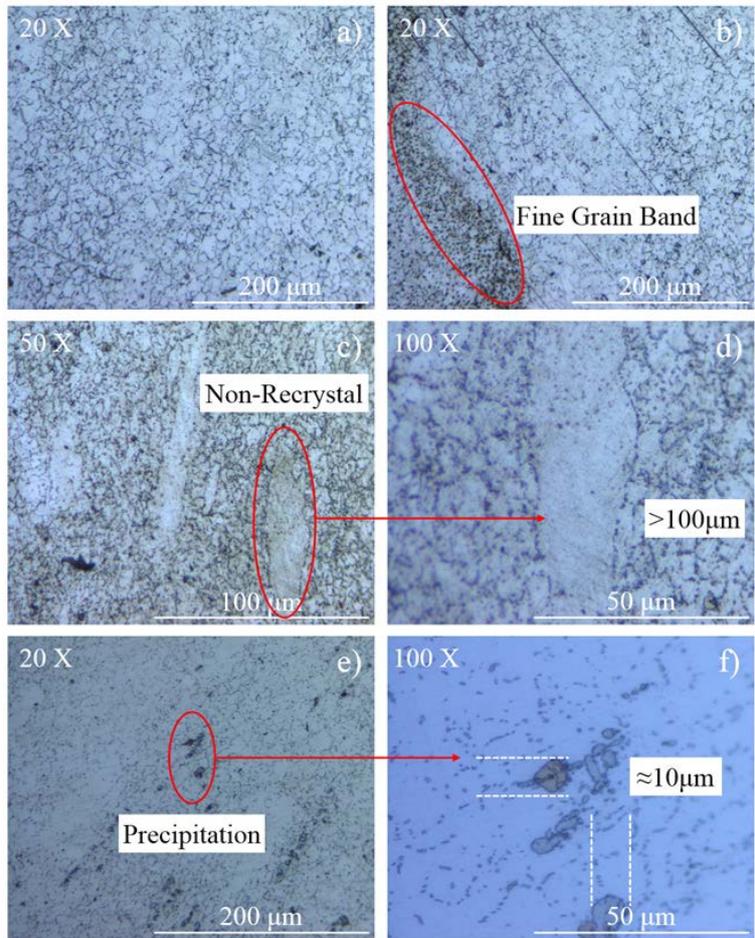


Figure 17 Micrographie OM de l'Inconel 718

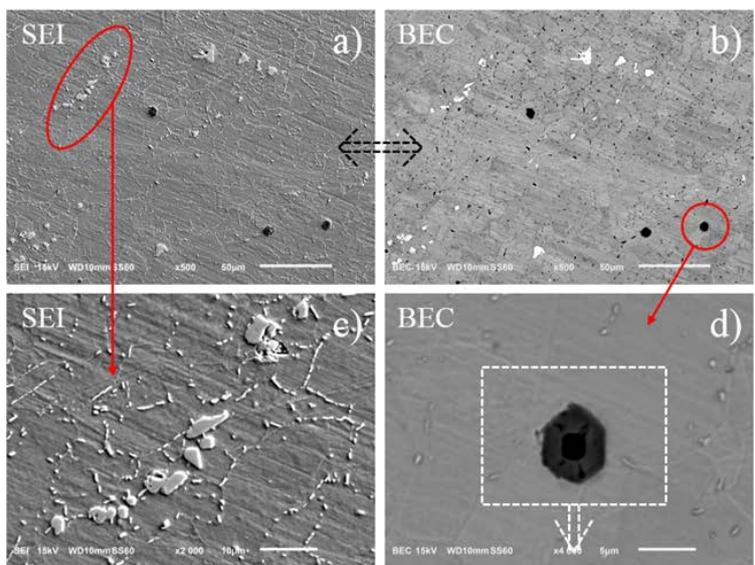


Figure 18 Micrographie SEM de l'Inconel 718

La micrographie à figure de pôle inverse (IPF) de l'Inconel 718 tel que reçu est illustrée à la figure (a). Tracer trois angles d'Euler à l'aide d'un schéma de couleurs RVB est le meilleur moyen de générer une carte d'orientation, qui est normalement appelée carte Euler. Un jeu de couleurs différent est utilisé par le jeu de couleurs IPF (Inverse Pole Figure), qui peut être interprété facilement et ne présente pas de changements de couleur considérables avec de petites modifications d'orientation. Il est clair qu'il existe de longues frontières jumelles avec une longueur de près de 100  $\mu\text{m}$  dans le grain non recristallisé.

La micrographie à écart d'orientation des grains (GOS) de l'Inconel 718 tel que reçu est illustrée à la figure 3.11 (b). Le GOS est calculé comme l'écart moyen de l'orientation de chaque point du grain par rapport à l'orientation moyenne du grain. La plupart des grains avec des joints de grains à grand angle bien développés se caractérisent par l'absence de structure interne et d'orientation uniforme. Certains grains possèdent toutefois une orientation interne, mais dans ces cas, la valeur du paramètre GOS ne correspond pas à la taille du grain. Plusieurs points jaunes et oranges apparaissent dans les "bandes de grain fin". Cela signifie que ce type de grain n'est pas suffisamment développé pour devenir le point potentiellement dangereux comme initiation de la fissure.

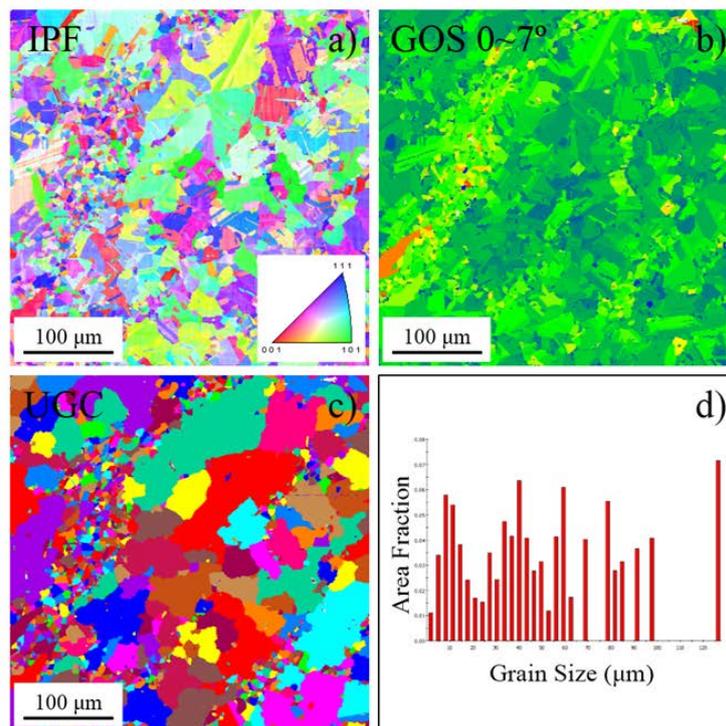


Figure 19 Micrographie EBSD de l'Inconel 718

## Propriété Macroscopique d'Inconel 718:

Un essai de traction uniaxial quasi statique sous contrôle de déplacement avec une vitesse de chargement de 0,05 mm / min est effectué à température ambiante. La relation contrainte-déformation obtenue lors de cet essai est illustrée à la figure 3.21. Il est évident que la limite d'élasticité après le traitement après vieillissement est de près de 1200 MPa, devenant plus de deux fois 550 MPa de matériau de réception As. La même situation se produit également avec la force ultime.

Cependant, la ductilité devient pire après le traitement thermique. La déformation totale à la rupture de l'éprouvette directement vieillie n'est que de 30%, alors que plus de 55% est atteint pour celui à la réception. (La limite maximale positive de l'extensomètre est de 50%, la contrainte réelle devrait être supérieure à 55%, en fonction de la tendance de déplacement des mors.)

Compte tenu des données de dureté données dans la dernière section, l'édition Inconel 718, telle que reçue, associe une faible dureté, une faible limite d'élasticité (relativement) et une grande ductilité. C'est la raison pour laquelle les billettes, les barres ou les plaques commerciales sont toujours vendues dans leur état d'origine sans aucun traitement.

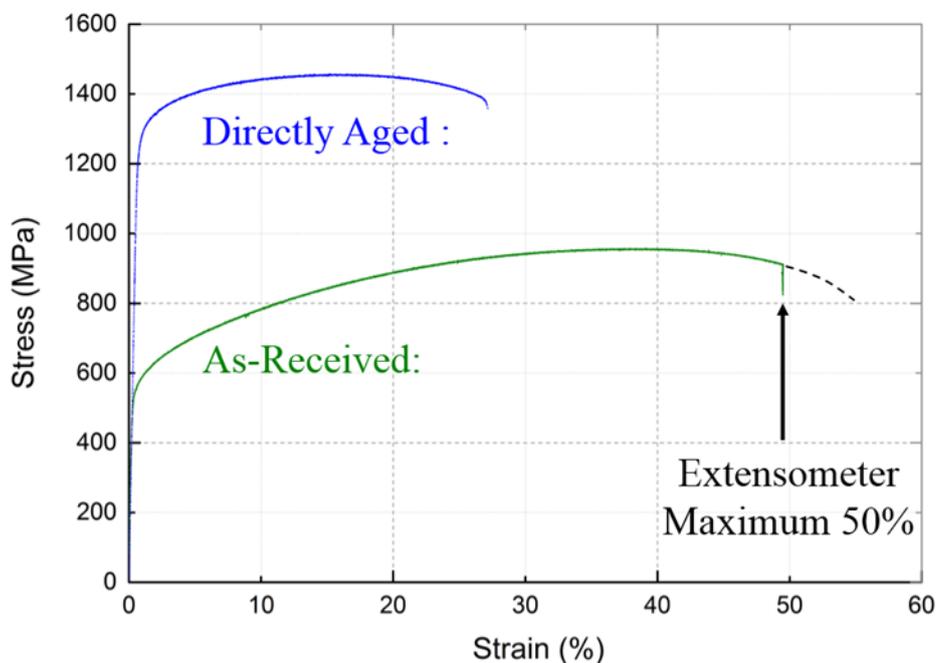


Figure 20 Courbe de Contrainte-Contrainte Quasi-Statique d'Inconel 718

Un essai de compression de tension en inverse complet sous contrôle de force / contrainte ( $R\sigma = -1$ ) à 0,1 Hz est effectué à température ambiante. Habituellement, il est préférable d'utiliser le contrôle de la contrainte dans ce type de test, tandis que pour éviter l'instabilité possible pendant le test passé, le contrôle du stress est utilisé dans le test. Au moins 3 niveaux de chargement sont choisis, totalement élastiques, légèrement plastiques et sensiblement plastiques.

As-Received:

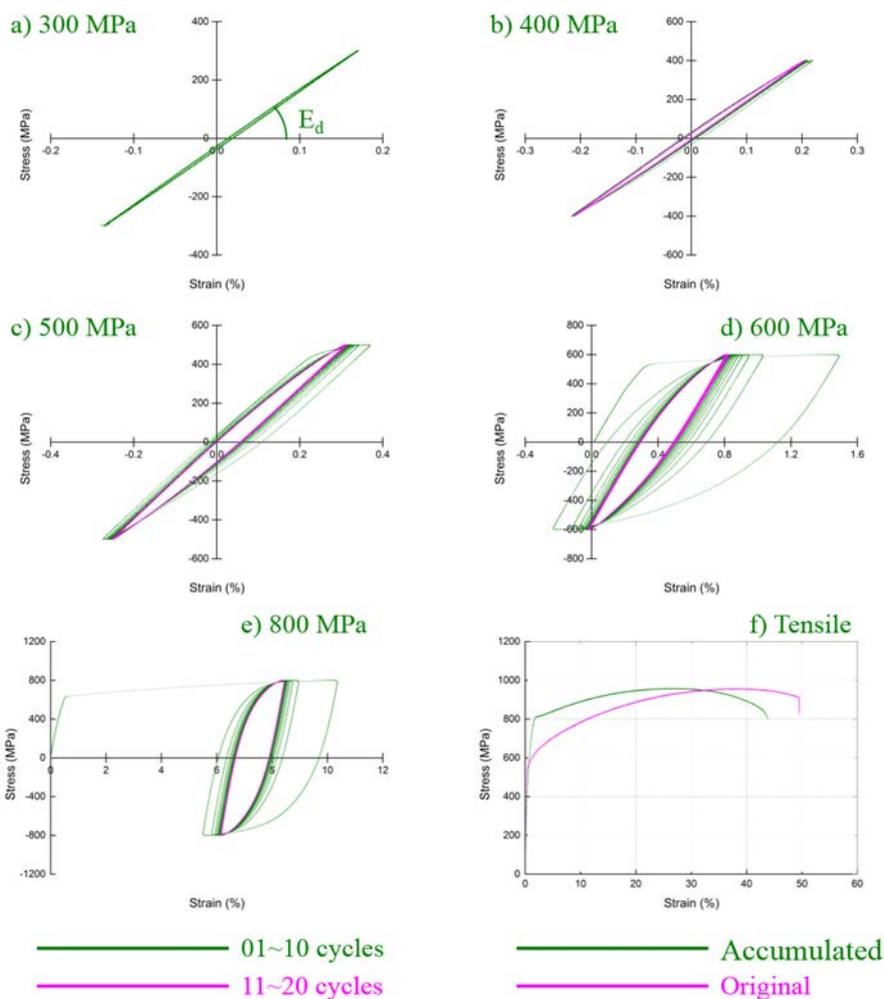


Figure 21 Boucle d'Hystérésis de Inconel 718

La boucle d'hystérésis se développe de large à étroite (relativement). Cela signifie que le durcissement cyclique existe pour le matériel tel que reçu. Et la boucle atteint et reste presque constante après presque 10 cycles (surlignés par des couleurs vives). Le phénomène de durcissement cyclique existe également dans les essais d'auto-chauffage par ultrasons.

La réponse cyclique de l'Inconel 718 à vieillissement direct est illustrée à la figure. Il reste totalement élastique jusqu'à 1000 MPa et se transforme en plastique lors du chargement de plus de 1200 MPa. La boucle d'hystérésis se développe de étroite à large. Cela signifie qu'il existe un léger ramollissement cyclique pour le matériau directement vieilli. Il atteint constant après 20 cycles à 1200 MPa, tout en continuant à diverger à 1300 MPa jusqu'à la rupture. Un assouplissement légèrement cyclique existe également dans le test d'auto-chauffage par ultrasons.

Directly Aged :

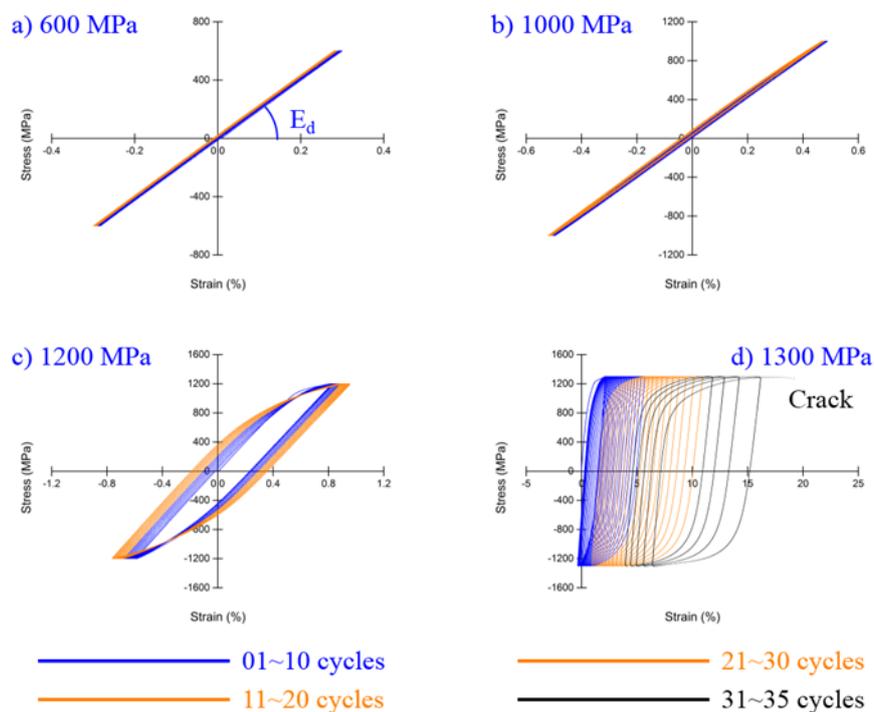


Figure 22 Boucle d'Hystérésis de Inconel 718 Agé

La pente entre la relation cyclique contrainte-déformation de la condition linéaire est appelée "module dynamique". Il augmentera légèrement au fur et à mesure que le taux de déformation augmente, cette valeur est indiquée dans la section suivante.

# Résultats de la Fatigue Ultrasonique

Le phénomène d'auto-échauffement et la propriété VHCF de l'Inconel 718 avec différents traitements thermiques ont été étudiés expérimentalement dans ce chapitre. La courbe S-N jusqu'à la durée de vie ultra longue ( $10^{10}$  cycles) a été effectuée à la fin de ce chapitre. La morphologie de fracture de l'Inconel 718 avec différents traitements thermiques est étudiée.

## Phénomène Auto-échauffement:

Le chargement de fatigue par ultrasons est un processus dissipé en énergie, qui accompagne la variation de température sur la surface de l'échantillon. Il est important de présenter les résultats d'auto-échauffement avant la caractérisation VHCF.

La température maximale obtenue à partir de toute la surface de l'échantillon sous différents niveaux de charge est indiquée à la figure. Il augmente rapidement après le début du test et se rapproche d'une valeur quasi stable après suffisamment de temps, par exemple 1000 s. La relation entre l'augmentation de température stationnaire et le niveau de charge est donnée en partie

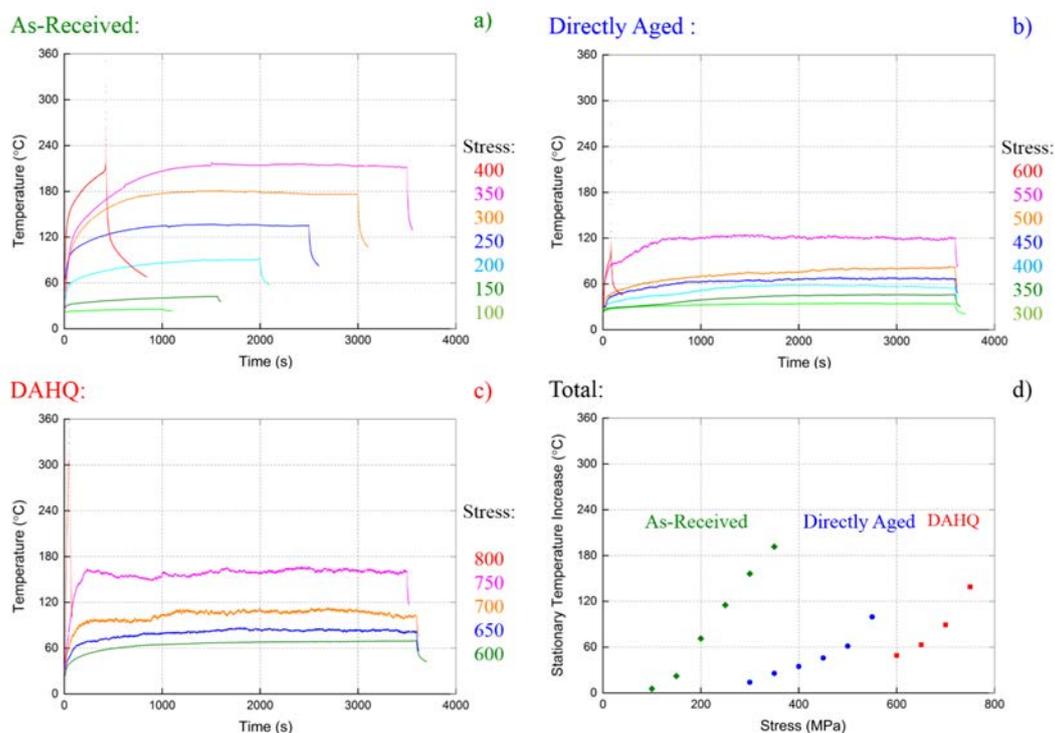


Figure 23 Phénomène Auto-échauffement d'Inconel 718 à 20 kHz

## Comportement VHCF d'Inconel 718:

Les résultats VHCF de l'Inconel 718 sous différents traitements thermiques à 20 kHz et à température ambiante sans aucun refroidissement ont été montrés à la figure. Ce nombre compte depuis le début du groupe jusqu'à son arrêt automatique, en raison de la perte de fréquence. Il est clair qu'Inconel 718specimen continue de respecter la limite d'endurance traditionnelle ( $10^7$  pour les alliages ferreux tels que l'acier au carbone et  $10^8$  pour les métaux non ferreux).

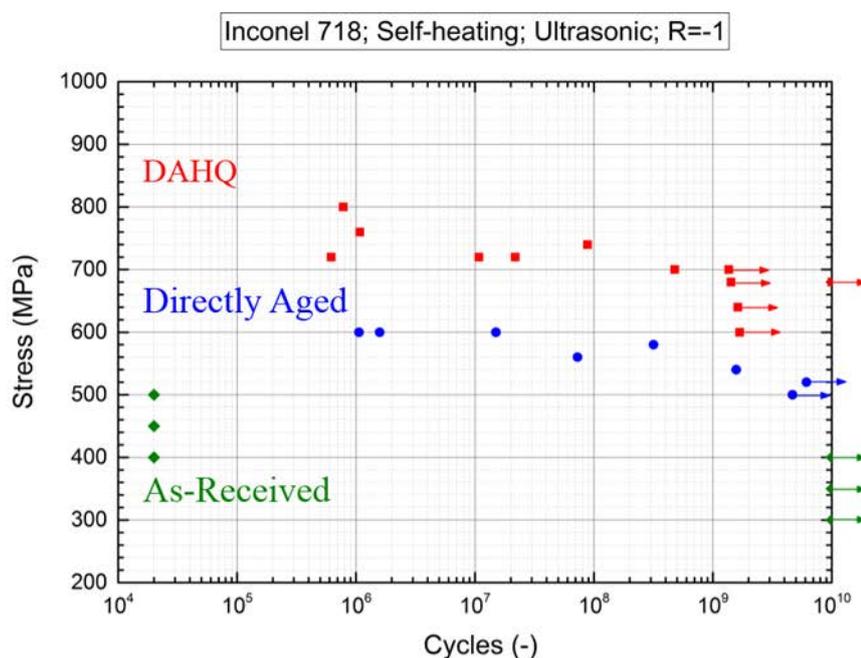


Figure 24 Comportement VHCF de l'Inconel 718 à 20 kHz avec Auto-échauffement

Pour le matériel reçu (olive), plusieurs remarques doivent être soulignées ici, à savoir que 20000 ou  $10^{10}$  cycles ne sont pas le nombre exact de cycles en cas de défaillance, il ne représente que la durée de vie minimale ou maximale de cette courbe, afin d'éviter un axe horizontal très long. En effet, toutes les éprouvettes chargées à plus de 400 MPa se cassent immédiatement, même moins d'une seconde, avant que toute vibration stable ne soit détectée. À l'inverse, les spécimens ne se brisent jamais lorsqu'ils sont chargés à moins de 400 MPa. Alors que, sous le niveau de chargement exact de 400 MPa, plusieurs spécimens se cassent immédiatement et d'autres ne cassent jamais. Il semble qu'il y ait le seuil, mais son activation dépend également d'autres conditions, par exemple la microstructure ou les effets environnementaux.

Pour les matériaux à vieillissement direct, la durée de vie en fatigue est sensible au niveau de contrainte de charge. Seule la différence de 100 MPa (ou 8,3% de la limite d'élasticité) est trouvée, correspond à la durée de vie en fatigue entre  $10^6$  et  $10^{10}$  cycles (10000 fois). En d'autres termes, pour le composant d'ingénierie civile ou commerciale, une amélioration significative pourrait être obtenue en diminuant une certaine valeur, au lieu de diviser le facteur de sécurité qui est toujours de 2 ~ 3. (Cette idée est seulement obtenue à partir de ce résultat de test de fatigue en utilisant un spécimen simple, peut-être ne peut pas être approprié pour le composant d'ingénierie réelle.)

Pour le matériau DAHQ, la durée de vie en fatigue montre une grande diffusion à certains niveaux de contrainte, par exemple 720 MPa. Près de 3 ordres de grandeur sont atteints sous le même stress. Une situation similaire se produit également à 700 MPa. En outre, la tendance de la courbe S-N de DAHQ 718 est vraiment proche de la précédente. Correspondant à la résistance à la fatigue entre  $10^6$  et  $10^{10}$  cycles, la différence de contrainte de charge est de 100 MPa, comme pour le matériau à vieillissement direct.

Les courbes directement agées et DAHQ montrent la même tendance ou les mêmes pentes, peut-être indique le même mécanisme de fracture. On pourrait supposer qu'il peut y avoir une asymptote horizontale après un test suffisamment long. Par exemple, à 680 MPa de matériau DAHQ, la fissure n'apparaît que jusqu'à 1010 cycles. Soit 500 MPa de matériau directement vieilli, car le test de  $6 \cdot 10^9$  cycles est déjà terminé sans fissure. Ceci est toujours en attente de validation dans le futur.

## Morphologie des Fractures:

La surface de la fracture (parallèle ou verticale à l'axe de l'échantillon) est observée à l'aide d'une caméra optique (pas de microscope) et d'un microscope électronique à balayage. En comparant la caractéristique morphologique de la fracture, le mécanisme de la fissure et le facteur d'influence sur la durée de vie en fatigue pourraient être révélés.

Avant la discussion classifiée par traitement thermique et durée de vie totale de la fatigue, certaines similitudes de toutes les fractures peuvent être présentées ici. Un seul site d'initiation existe dans toutes les situations, indépendamment du traitement thermique, du niveau de charge, de la température ou de la durée de vie en fatigue.

Il n'y a pas de "fish-eye" dans toute la fracture, ce qui est la caractéristique spécifique de certains tests VHCF. En d'autres termes, tout le site d'initiation est en surface ou proche du sous-sol, pas dans la masse du spécimen. Le stress résiduel est peut-être la raison pour laquelle l'initiation se situe à la surface du sol plutôt que sur la surface, mais il est difficile à mesurer en raison de la forme du sablier.

La durée de vie totale dans la gamme de  $10^7$  sera définie comme relative "vie courte", tandis que la durée de vie en fatigue proche du niveau de  $10^9$  sera appelée "vie longue". Pour chaque traitement thermique, un seul point de moins de  $10^7$  cycles de vie et un autre de longue durée de vie seront choisis pour l'analyse de la fracture.

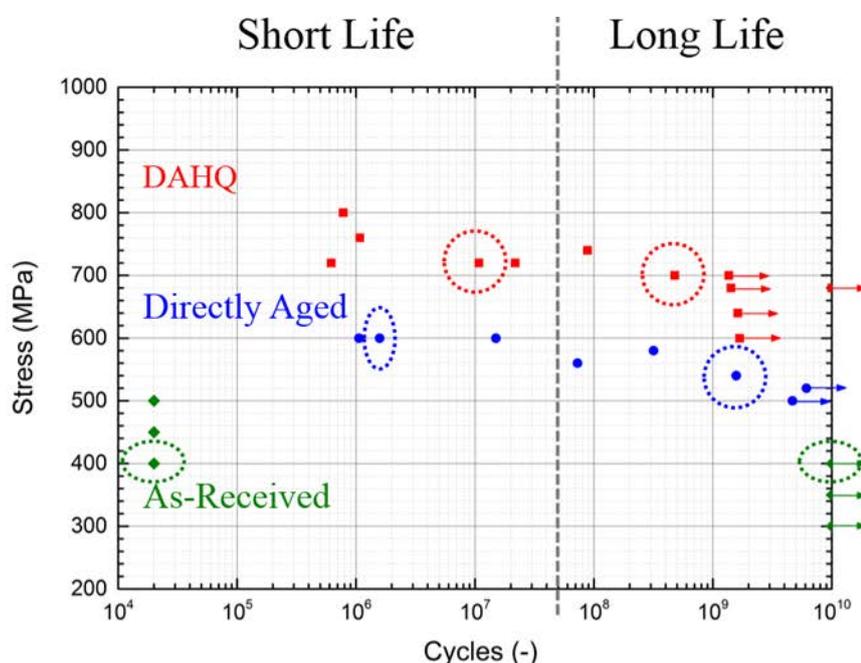


Figure 25 Points Choisis pour l'Analyse des Fractures

L'imagerie optique de l'échantillon et de la surface de fracture avec DAHQ Inconel 718 est illustrée à la figure. Il en est de même pour les spécimens âgés qu'il n'y a pas de trace de brûlure autour de la fissure (a), de sorte qu'il est difficile de voir la fissure à la verticale de l'axe de l'échantillon. Pour l'imagerie parallèle à l'axe, l'aire de propagation de la fissure (b / c) semble exister en 3 étapes différentes, selon la morphologie lisse ou grossière, la propagation lente radiale, la propagation radiale rapide et la crête circumférentielle très rugueuse. Ce type d'asymétrie pourrait éviter la macro fissure destructive dans le composant d'ingénierie.

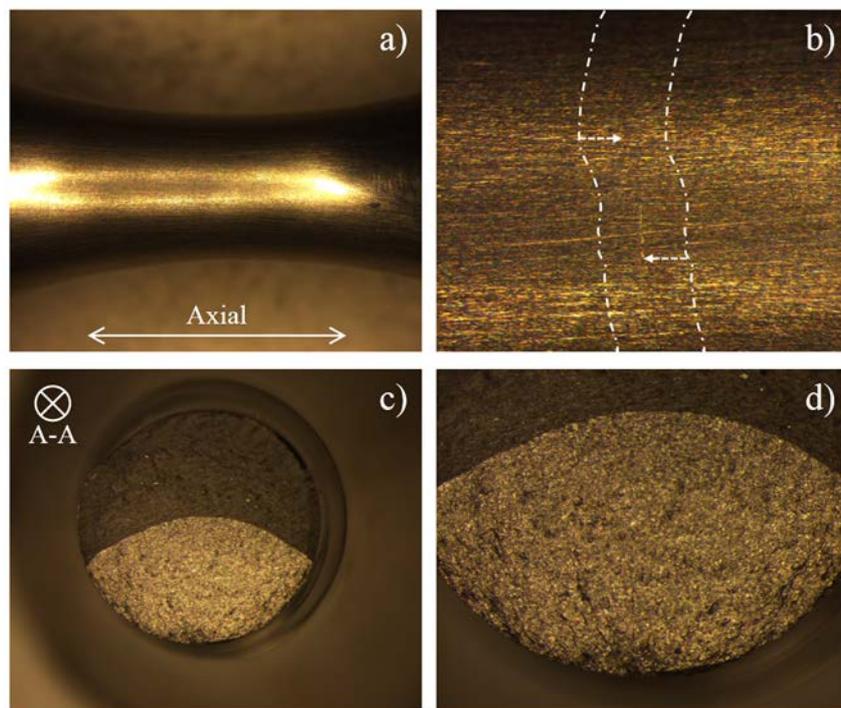


Figure 26 Image OM de la Fracture de l'Inconel 718

La micrographie MEB de la surface de fracture de courte durée de vie pour DAHQ Inconel 718, sous une charge de 720 MPa et une durée de vie totale de  $1,50 \cdot 10^7$  cycles, est illustrée à la figure. Comme pour les spécimens âgés avec une courte durée de vie, la fissure semble initier à la particule sous la surface dans la partie (c), et la composition chimique de celle-ci est identique à celle de l'entourage, selon l'imagerie de l'ESB présentée dans la partie (d). A la différence de la dernière situation, la "particule" pourrait être un groupe de grains ou seulement un grand, pas une facette, joue un rôle important dans les premiers stades du développement de la microfissure. Le diamètre de cette grappe est d'environ  $30 \mu\text{m}$  et se situe à  $50 \mu\text{m}$  de la surface de l'échantillon.

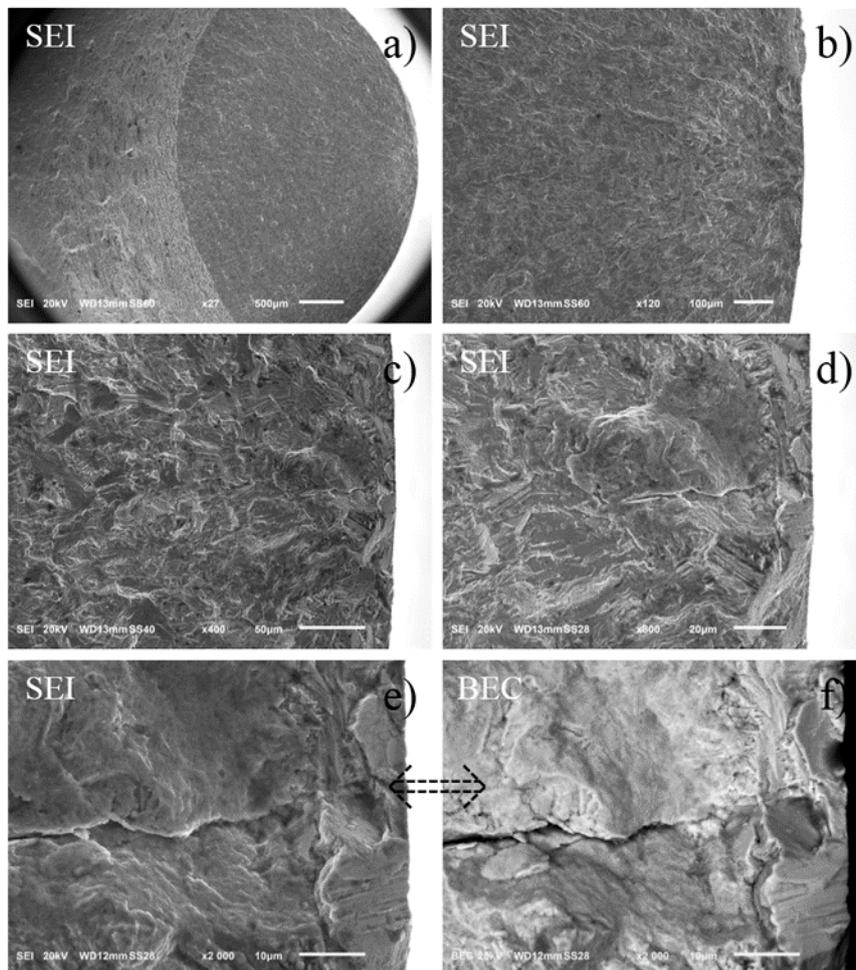


Figure 27 Micrographie SEM de la Fracture de l'Inconel 718

# Analyse des Résultats

## Mécanisme de Fracture:

Le mécanisme de fracture de l’Inconel 718 sous charge ultrasonore est décrit en comparant notre micrographie avec une autre de la littérature. Le comportement des petites fissures et la rupture du superalliage à base de nickel sous fatigue par ultrasons sont étudiés dans le domaine des très hauts cycles dans l'air ambiant à température ambiante.

L'évolution de l'endommagement de la surface soumise à la fatigue par ultrasons est surveillée au microscope optique en utilisant une technique de réplique, illustrée à la figure.

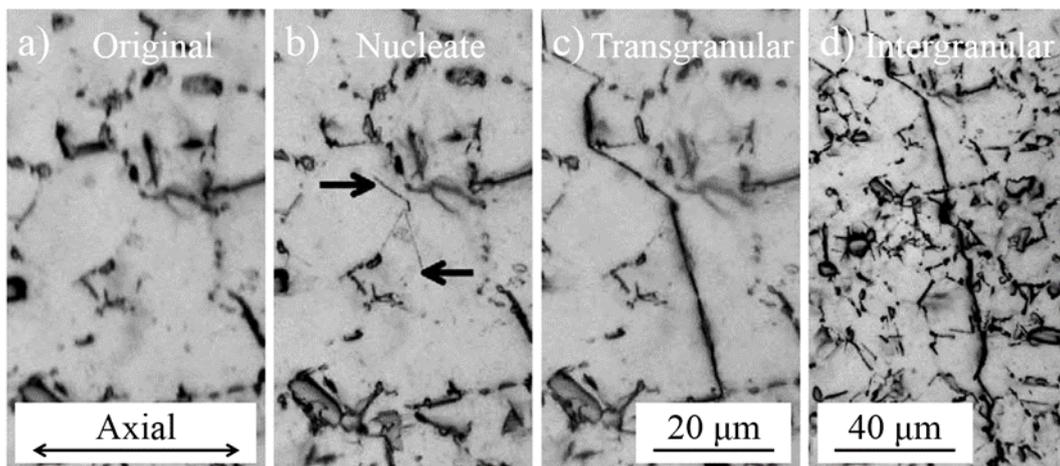


Figure 28 Micrographie Optique de la Nucléation et Propagation de Petites Fissures

La petite fissure se produit à partir des bandes de glissement près du joint de grain (b), puis progresse initialement de manière transgranulaire (c) et tend à tracer les joints de grains de manière intergranulaire après avoir dépassé  $\approx 100 \mu\text{m}$  (d). Plus de 80% de la durée de vie en fatigue passe par la nucléation et le développement de petites fissures jusqu'à 100 mm. La suppression de la nucléation des fissures et la croissance précoce des fissures contribuent principalement à l'amélioration de la durée de vie en charge ultrasonore

Il n'y a pas de particule évidente au centre de la zone de nucléation (N), pas comme le court spécimen de vie. La fissure provient peut-être de bandes de glissement ou de joints de grains, qui sont considérés comme des sources plus faibles. La fissure secondaire améliore la durée de vie en fatigue, mais le mécanisme de formation de cette fissure secondaire n'est toujours pas clair. La présence d'une fissure secondaire pourrait être la preuve d'une déformation plastique importante en amont du fond de fissure.

La rupture par clivage avance initialement en mode ductile transgranulaire dans la zone (T), après une profondeur de 80  $\mu\text{m}$  de la surface de l'échantillon, marquée par le cercle de points plus petit. La trace de vol à voile s'est produite dans la direction 45° de la fissure principale.

Ensuite, la fissure a tendance à tracer les joints de grains de manière intergranulaire après avoir dépassé 150  $\mu\text{m}$  en mode mixte dominé par le clivage dans la zone (I), marquée par le cercle de points le plus grand.

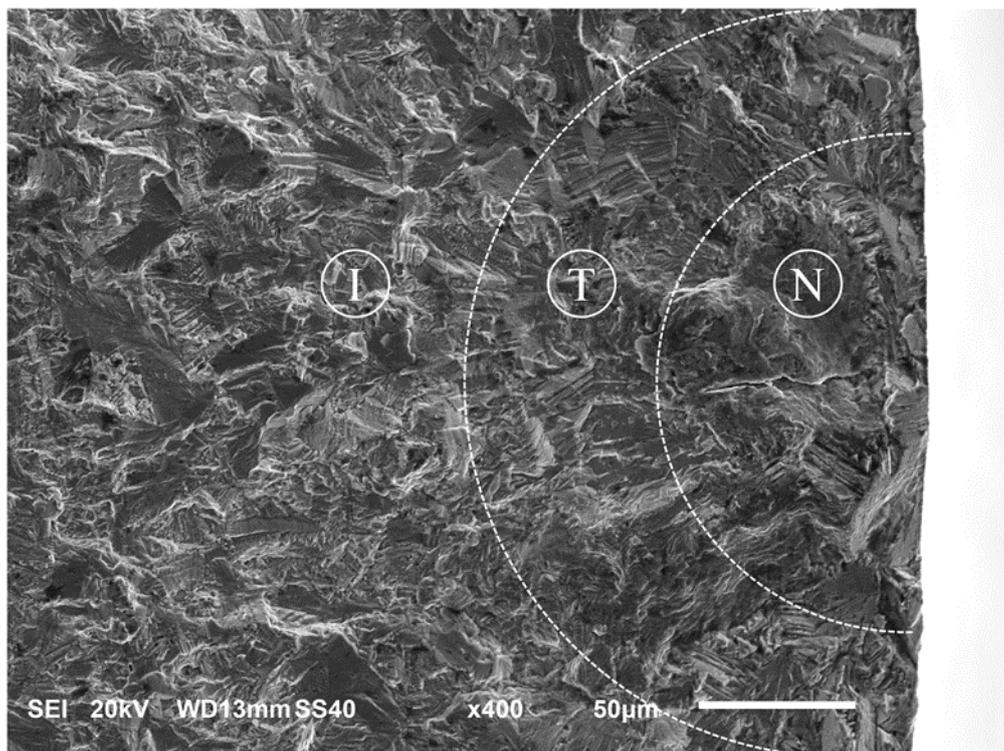


Figure 29 Micrographie SEM de la Fracture de l'Inconel 718

## Prédiction de la Vie:

La prévision de la durée de vie en fatigue et le montage des données d'essai de l'Inconel 718 à 20 kHz et de la température ambiante sans refroidissement sont illustrés à la figure. La dispersion des résultats du test de fatigue est maintenant acceptée comme un fait expérimental et physique. Il est généralement trop difficile ou trop coûteux de supprimer complètement certaines des causes des erreurs expérimentales. C'est pourquoi des méthodes statistiques doivent être utilisées pour déterminer expérimentalement les caractéristiques du phénomène de fatigue.

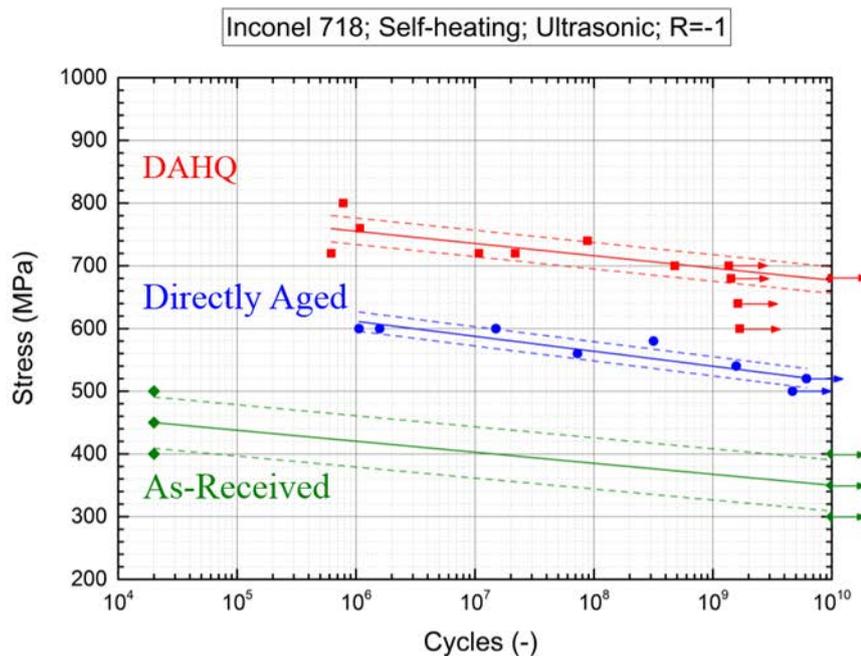


Figure 30 VHCF Données Expérimentales et Montage de l'Inconel 718 à 20 kHz

En supposant que la distribution de la contrainte de charge pour le cycle de vie de fatigue donné suit la distribution normale, également appelée distribution de Gauss Laplace. La ligne de montage indiquée ci-dessus se produit à une probabilité de 50% de rupture par fatigue. Par conséquent, la prédiction de la courbe P-S-N (par exemple, P = 84% et 16%) peut être obtenue par addition et soustraction d'un écart-type, indiqué par la ligne de points de la figure.

## Dissipation d'Energie:

L'hypothèse 0D est choisie dans le calcul de l'énergie dissipée de l'Inconel 718 à 20 kHz et de la température ambiante sans refroidissement. Le schéma du modèle 0D est illustré à la figure. Température maximale de la surface utilisée dans ce calcul.

Il n'est pas assez précis d'utiliser le modèle 0D, car tout le transfert de chaleur entre la surface de l'échantillon et son environnement est considéré par une seule constante  $\tau$ , y compris la conduction avec l'autre partie de l'échantillon.

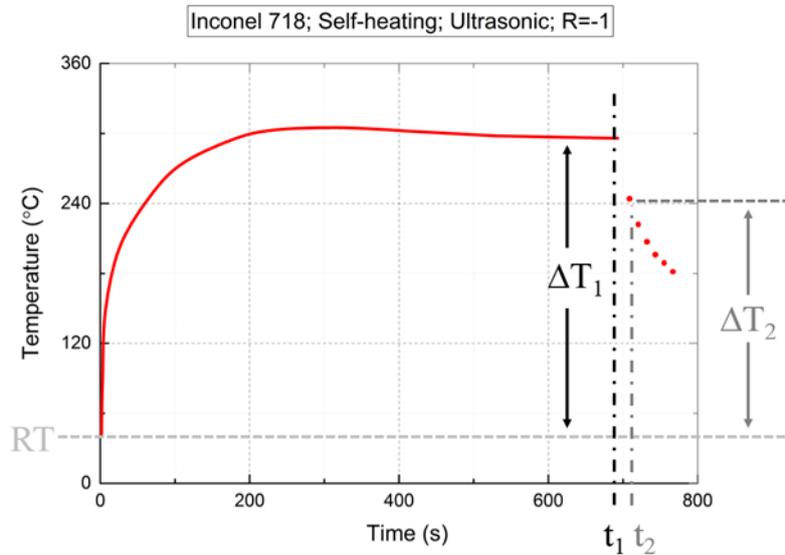


Figure 31 Schéma du Modèle 0D pour le Calcul de la Dissipation d'Energie

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C \frac{d(\Delta T_1)}{dt} = \frac{\Delta T_1}{\tau^{0D}} + d_1 = 0 \\ \rho C \frac{d(\Delta T_2)}{dt} - \frac{\Delta T_2}{\tau^{0D}} = d_2 = 0 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \Delta T_1 \approx \Delta T_2$$

afin que

$$d \approx \rho C \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{t_2 - t_1}$$

La figure montre la dissipation de l'énergie et des lignes de montage lors de l'essai de fatigue par ultrasons de l'Inconel 718 à 20 kHz et à la température ambiante. L'auto-échauffement est calculé à partir des données présentées à la section.

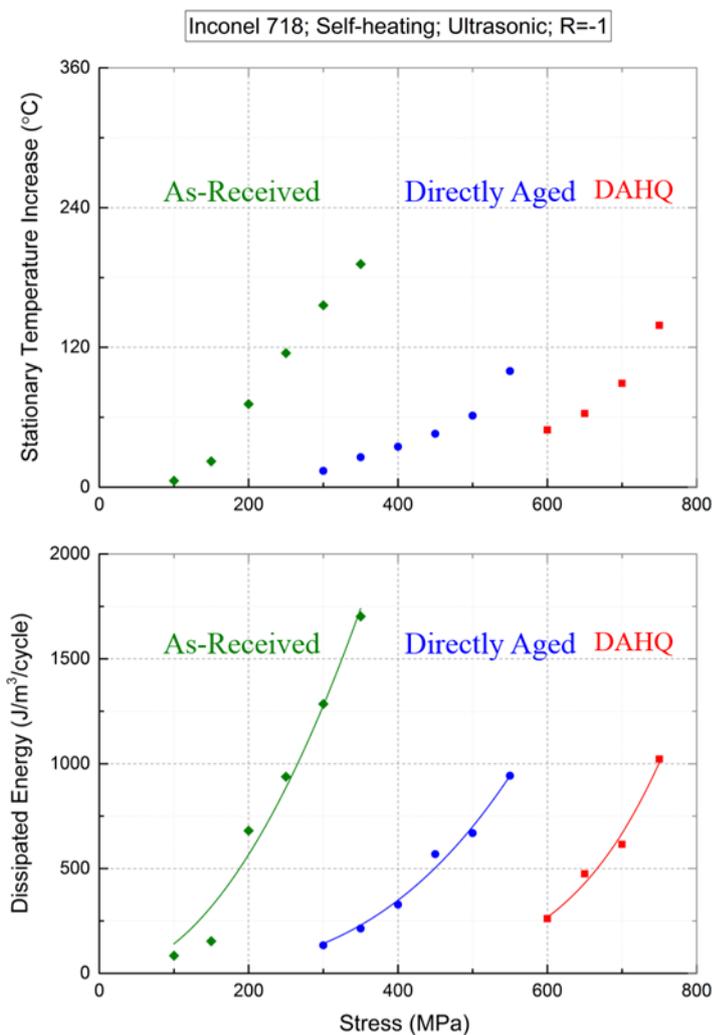


Figure 32 Augmentation de la Température Stationnaire et de l'Energie Dissipée

L'exposant de ces 3 types de matériel présente des différences significatives. Pour le matériel reçu, il est très proche du numéro 2, largement utilisé par un autre auteur dans les références, pour la simulation d'auto-échauffement des métaux ferreux. Pour le matériau Directement Agé et DAHQ, cet indice augmente lorsque la résistance ultime ou la résistance à la fatigue augmente. Il semble plus sensible au niveau de chargement. Si vous comparez la valeur absolue de l'énergie dissipée au même niveau de contrainte, elle diminue à mesure que la résistance ultime ou la résistance à la fatigue augmente.