

«Gestion des risques industriels »

NEWS 55 - Nov 2021

## Newsletter N°55 : CONDITIONS EXTREMES / RISQUES INDUSTRIELS

### L'aéronautique : le fluage & la conception des aubes

#### 1. Le fluage : moteur au niveau de la conception des aubes de turbine dans l'aéronautique.

Il est possible d'observer deux grands modes de mécanisme de fluage que l'on retrouve dans le diagramme d'Ashby (Cf. figure 1). Cet outil correspond à une représentation schématique d'une carte de déformations, en fonction de température, normalisée par la température de fusion du matériau et de la contrainte appliquée, elle-même normalisée par le module de cisaillement du matériau.

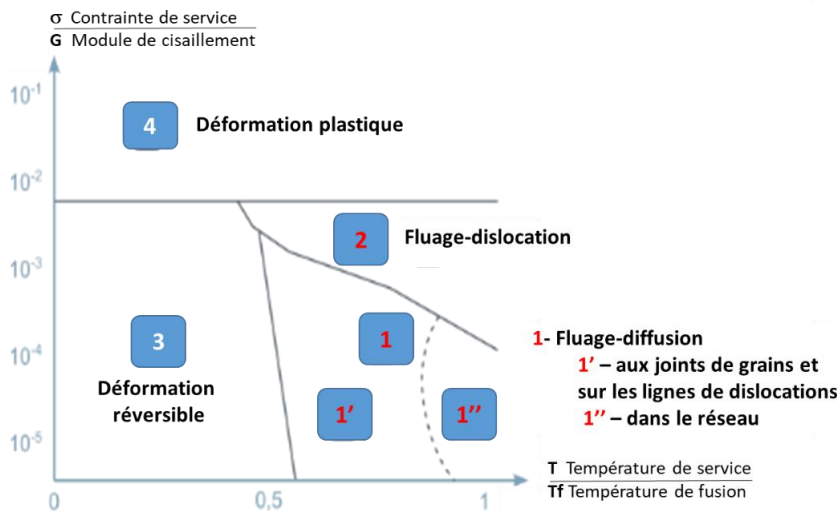
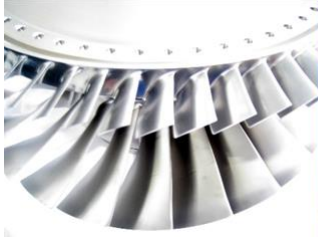


Figure 1 : Diag. d'Ashby : Représentation schématique des mécanismes de déformation. [MINE XX]

A faible contrainte et basse température, le matériau se déforme de façon réversible (régime 3). A plus forte contrainte, la déformation plastique par glissement - simple ou multiple - des dislocations se produit, (régime 4).

Lorsque la contrainte est faible, en deçà de la limite d'élasticité du matériau considéré, mais que la température est élevée, le fluage est opérant (régimes 1 et 2). Pour les domaines correspondant aux plus basses contraintes et températures, le fluage se fait par diffusion thermique avec l'activation des défauts ponctuels principalement le long des joints de grains et le long des lignes de dislocations présentes dans le matériau, c'est le régime (1') de fluage-diffusion intergranulaire décrit par Coble. Si la température est proche de la température de fusion du matériau, les défauts ponctuels ne nécessitent pas de support pour diffuser et peuvent se déplacer, de façon relativement facile, dans le réseau cristallin même, c'est le régime (1'') de fluage-diffusion en réseau, transgranulaire décrit par Herring-Nabarro.

Lorsque température et contrainte sont proches des valeurs seuil (température de fusion et la limite d'élasticité des matériaux), alors les dislocations coin peuvent monter et provoquer ainsi une déformation plastique importante qui s'ajoute à la déformation générée par la diffusion des défauts



«Gestion des risques industriels »

NEWS 55 - Nov 2021

punctuels, c'est le régime (2) de fluage-dislocation. La vitesse de déformation est contrôlée par le mouvement des dislocations qui suit principalement les plans de glissement et les directions denses du réseau cristallin du matériau sollicité.

Si l'on étudie deux diagrammes d'Ashby pour un même matériau mais ayant des tailles de grains différentes, on s'aperçoit que les lignes d'iso-vitesse de déformation (en  $s^{-1}$ ) sont décalées vers les hautes températures lorsque la taille des grains augmente (Cf. figure 2). Ce phénomène est principalement observable dans le domaine de fluage diffusion.

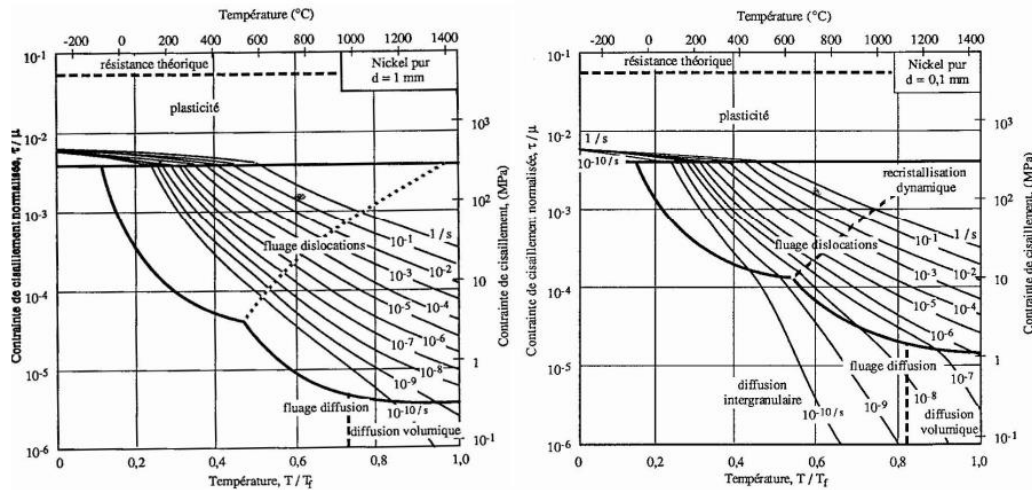


Figure 2 : Comparaisons des courbes d'iso-vitesse de déformation pour du nickel pur avec des tailles de grains de 1mm et 0,1mm. [SCHM 14]

On confirme bien le fait que la tenue en fluage des alliages métalliques est étroitement liée à la taille de grains. Le développement des générations successives d'aubes de turbines des turboréacteurs, élaborées par fonderie en superalliage à base nickel, est très emblématique des recherches visant à optimiser la taille et la morphologie des grains (Cf. figure 3).

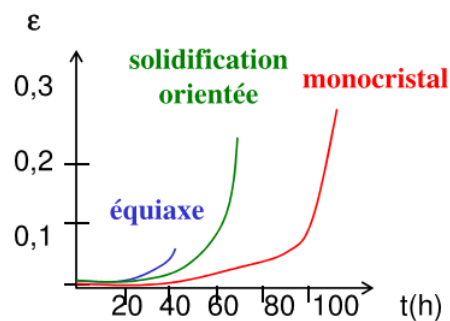
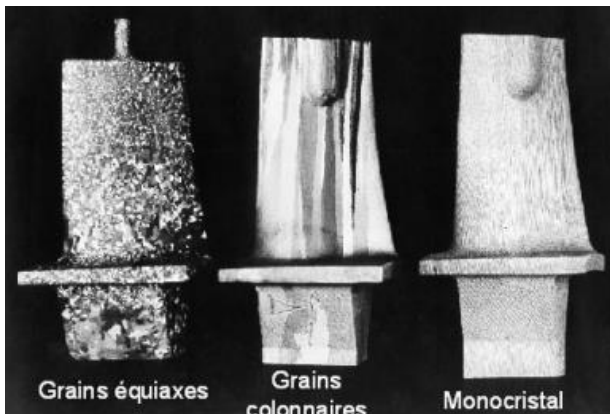


Figure 3 : Evolution microstructurale des superalliages base nickel pour aubes de turbine et incidence sur les résultats de fluage. [CARO 04 ; SCHM 14]



«Gestion des risques industriels »

NEWS 55 - Nov 2021

L'idée majeure permettant d'améliorer la tenue en fluage des aubes fut dans un premier temps de provoquer une croissance contrôlée des grains et de les orienter dans une direction parallèle à l'effort appliqué, essentiellement lié à la force centrifuge générée par la rotation du moteur. Cette solidification à grains orientés a permis de multiplier par 4 la durée de vie par rapport à une aube forgée. Ensuite, l'idée d'augmenter la taille des grains et d'éliminer la composante transverse des joints de grains est poussée à son paroxysme en créant des aubes contenant qu'un seul grain, on parle d'une solidification monocristalline à partir d'une technique de fonderie à cire perdue [MINE XX]. Cette dernière technologie (Cf. figure 4) a permis de travailler avec des températures des gaz en entrée de turbine proche de 1100°C comme le montre la figure 18 et une multiplication de la tenue au fluage par 9 toujours par rapport à un produit forgé.

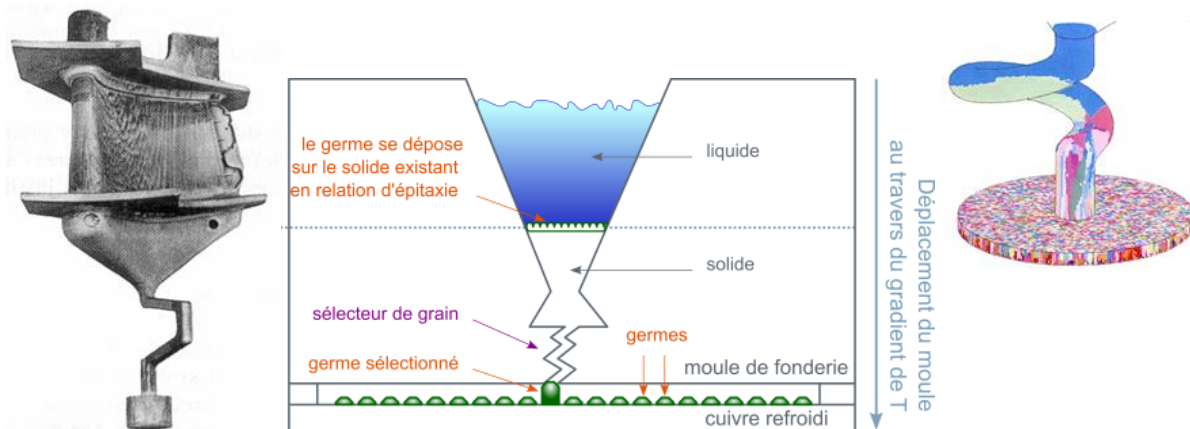


Figure 4 : Solidification dirigée : principe du procédé de fonderie à la cire perdue avec sélecteur de grain développé pour la solidification monocristalline [KHAN 09 ; MINE XX].

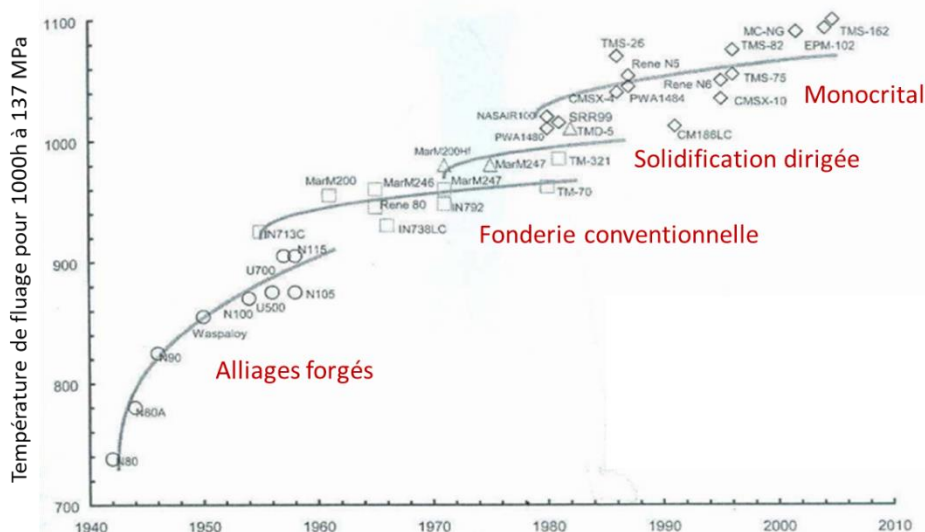


Figure 5 : Evolution de la résistance au fluage des superalliages à base nickel pour aube depuis leur création : température à laquelle chaque matériau à une durée de vie de 1000h sous une charge de 137 MPa en fonction des années de développement. [DIRA 11]



«Gestion des risques industriels »

NEWS 55 - Nov 2021

Il est déjà envisagé, pour des conditions de fonctionnement au-delà de 1200°C, d'utiliser des intermétalliques réfractaires, comme les siliciures NbSi / MoSi ou des composites à fibres et matrices céramique (type SiC-SiC) voir même des céramiques structurales à base de mélanges d'oxydes plus ou moins complexes contenant des terres rares. [GUED 14 ; KHAN 09]

Dans cette course à l'augmentation du rendement des turbines, en jouant sur l'élévation de la température d'entrée des gaz, beaucoup d'évolutions ont eu lieu également au niveau de l'architecture de l'aube pour optimiser le refroidissement interne et au niveau des traitements de surface avec la mise en place de barrière thermique au-dessus de 1000°C dans les années 80 (Cf. Figures 6).

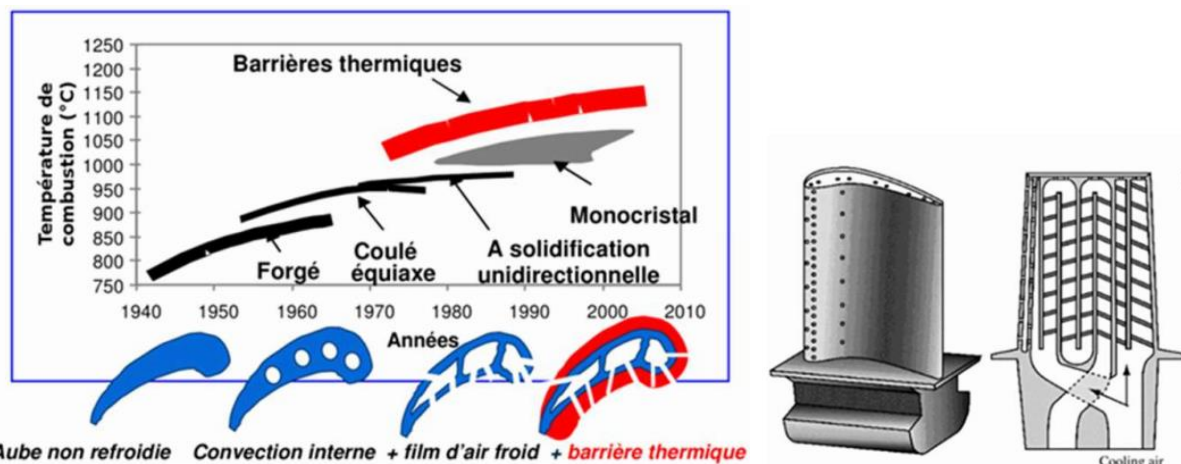


Figure 6 : Evolution des technique de refroidissement depuis la création des aubes jusqu'en 2010. [DEYB 04 ; NOZA 16]

Cet article sur les conditions extrêmes associées aux températures nous a permis de dresser un aperçu des principaux problèmes que rencontre le métallurgiste :

- Diminution de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique et les solutions pour limiter ce phénomène avec les phases G.P.C (Geometrically Close-Paked) et précipités cohérents avec la matrice qui renforcent sans fragiliser la matrice à chaud,
- De la protection des pièces face à de corrosion à chaud et oxydation catastrophique avec le développement de couches barrières protectrices, continues, adhérentes et stables dans le temps,
- Des problèmes de fluage en s'intéressant aux aubes de turbines à gaz ou de réacteurs d'avion.

La description de la fabrication d'une aube de turbine nous a également permis de partager un état de l'art concernant le design du circuit de refroidissement en mode « bloc foré » et les procédés d'élaboration permettant d'optimiser la structure métallurgique en vue d'augmenter la tenue au fluage par la fabrication de pièce mono-grain en sélectionnant l'orientation cristalline de celui-ci. Ces évolutions technologiques de haute volée ont permis l'utilisation de gaz en entrée de turbine à des

**«Gestion des risques industriels »****NEWS 55 - Nov 2021**

températures proches de 1100°C, ce qui a accru de façon conséquente les rendements des systèmes de propulsion. A partir de 1000°C, nous avons vu qu'il était nécessaire de revêtir les aubes d'une barrière thermique afin de limiter son échauffement en cours d'utilisation.

### Bibliographie

- [CARO 04] P. Caron, « Superaliages pour aubes monocristallines : historique du développement et propriétés », Séminaire ENSMP, Evry, Déc. 2004.
- [DIRA 11] L. DIRA, « Fluage à haute température d'un superalliage monocristallin : expérimentation in situ en rayonnement synchrotron », Thèse soutenue en nov. 2011
- [DEYB 04] S. Deyber, « Architectures matériaux pour turbines haute pression aéronautiques », Séminaire ENSMP, Evry, Déc 2004.
- [GUED 08] JY Guedou, « Evolutions récentes des superalliages base Ni pour pièces critiques de turboréacteurs aéronautiques » Conférence A3TS, 12 juin 2008.
- [GUED 14] JY Guedou, « Des matériaux incontournables pour les turboréacteurs aéronautiques : les superalliages base nickel », Conférence SF2M, Mai 2014
- [KHAN 09] Tasadduq KHAN, « Matériaux pour turbomachines aéronautiques : enjeux et opportunités », Séminaire CNAM, 18 juin 2009.
- [MINE XX] Cours Ecole des Mines d'Albi, <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM6uc4-2.html>
- [MUGA 02] FR. Muga, « Features of direct cycle gas turbine, High temperature reactor school », Conférence Cadarache – Novembre 2002.
- [NOZA 16] F. Nozahic, « Elaboration par spark plasma sintering et caractérisation de composites et multicouches zirconium yttrium/MoSi2(B) pour application barrière thermique auto-cicatrisante », Thèse soutenue le 28 novembre 2016.
- [SCHM 14] JH. Schmitt, « Matériaux Hautes Performances – Fluage », Cours de l'ECP, 2014.