

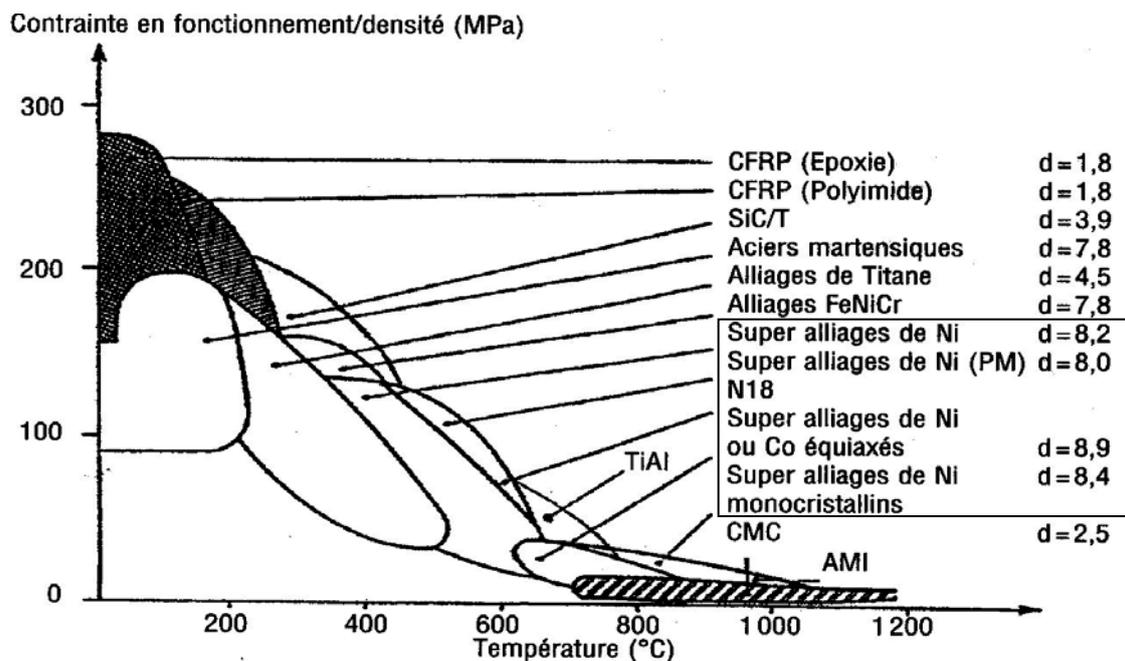
DES MATERIAUX INCONTOURNABLES POUR LES TURBOREACTEURS AERONAUTIQUES : LES SUPERALLIAGES BASE NICKEL

Jean-Yves GUEDOU

SAFRAN- Snecma

1 - CONTEXTE

Les turboréacteurs aéronautiques sont des machines complexes dans lesquelles la mécanique et la thermique interfèrent fortement, à des niveaux de sollicitations élevés pendant des durées de fonctionnement longues. Les ingénieurs confrontés à cette problématique ont mis au point des matériaux spécifiques de haut degré technologique, capables de satisfaire ces conditions de chargement extrêmes. De nombreuses nuances d'alliages métalliques ont été mises au point dans les années 70-80 pour les pièces critiques, qu'il s'agisse d'aciers, d'alliages de titane ou de **superalliages de nickel** : ces matériaux présentent aujourd'hui une excellente robustesse et un très haut niveau de fiabilité.



Classes de matériaux dans les turboréacteurs

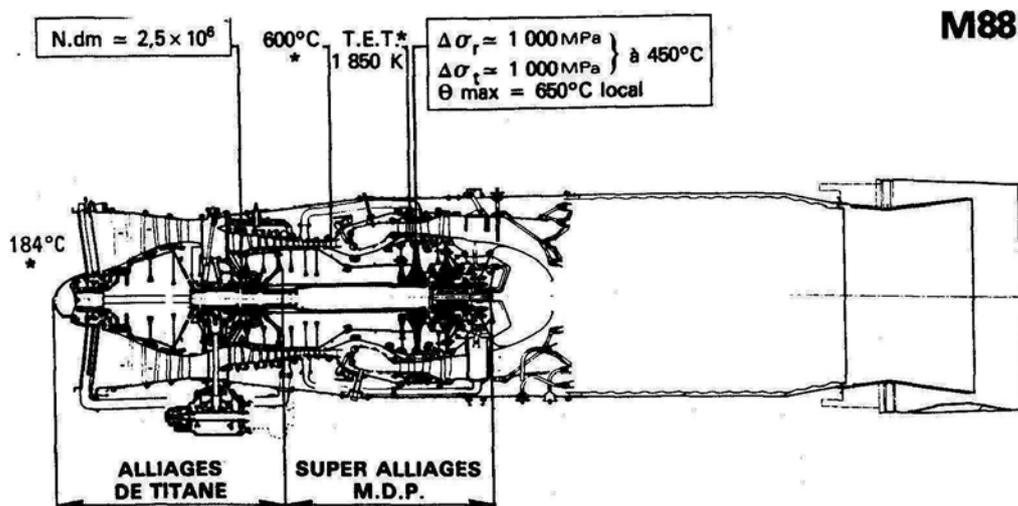
Les questions d'ordre mécanique afférentes aux matériaux utilisés pour les pièces les plus sollicitées, en correspondance avec les conditions d'utilisation des turboréacteurs gouvernent le choix et les axes de développement de ces matériaux : les modes d'endommagement propres à chaque type de pièce critique, c'est-à-dire principalement les pièces tournantes que sont les disques et les aubes, seront brièvement exposés avant d'aborder les particularités de ces « curiosités métallurgiques » que sont les superalliages à base nickel. En particulier leur aptitude à présenter de bonnes résistances mécaniques à haute température. Les développements les plus récents de ces matériaux semblent indiquer que le niveau de performance exceptionnel qu'il atteignent ne pourra plus être sensiblement amélioré avec de nouvelles compositions les seuls gains limités pouvant être obtenus par le dépôt de revêtements isolants céramiques qui permettent d'augmenter encore la température des gaz environnants. Néanmoins, ces matériaux font encore l'objet de nombreuses études intégrant les procédés de mise en œuvre, afin de mieux appréhender et réduire la dispersion de leurs propriétés mécaniques : une modélisation rhéologique et métallurgique accompagne

souvent ces développements. Les superalliages à base cobalt, longtemps is à l'écart, font à nouveau l'objet d'études avec tous les outils nouveaux maintenant disponibles. Une perspectives sur les matériaux au-delà des superalliages, permettant des gains importants en termes de température d'utilisation sera ouverte en conclusion.

2 - SOLLICITATIONS THERMIQUES ET MECANIQUES DANS LES TURBOREACTEURS

La poussée d'un turbo-réacteur est obtenue par une importante compression de gaz, générée par mise en rotation de pièces, et accompagnée d'échauffements importants à leur niveau. Les pièces tournantes (disques, aubes, arbres) sont donc le siège de contraintes mécaniques centrifuges, directement corrélées à la vitesse de rotation (à la puissance 2) et donc cyclées selon les variations de régime du moteur, suivant des périodes longues (de quelques minutes pour certaines phases de vol à une dizaine d'heures pour une croisière long courrier). Les efforts aérodynamiques, propres à toute machine tournante, générant des contraintes de faibles amplitudes et fortes fréquences, se superposent aux contraintes centrifuges.

Enfin, l'accroissement de température des gaz jusqu'à 1 500°C s'accompagne de celui des pièces qui est plus modéré ; mais les composants les plus chauds atteignent 1 100°C, de façon hétérogène en raison des inerties thermiques, et variable suivant les plages de fonctionnement : les gradient thermiques ainsi créés sont sources de contraintes thermiques, qui s'ajoutent algébriquement aux contraintes mécaniques.



Sollicitations thermomécaniques et matériaux dans les pièces critiques du M88 (moteur du Rafale)

Les aubes de compresseurs sont le siège de contraintes dynamiques à haute fréquence, superposées à des contraintes centrifuges assez élevées. Les critères d'endommagement à prendre en compte se rapportent aux courbes de fatigue endurance, l'objectif étant que les sollicitations soient au-dessous des valeurs asymptotiques limites.

Les aubes de turbine sont les pièces les plus chaudes du moteur et il faut par conséquent les refroidir. Elles subissent à la fois des effets de températures associées à des contraintes centrifuges élevées (cause de fluage) et des efforts cyclés principalement d'origine thermique générant des endommagement en fatigue oligocyclique. L'évolution rapide et continue des sollicitations thermiques et mécaniques dans ces pièces est bien représentée par la fatigue thermo-mécanique, des essais de laboratoire reproduisant un cyclage simultané des contraintes et températures. Les effets d'environnement (oxydation et corrosion) constituent en outre un facteur bien souvent aggravant pour la durée en service de ces composants.

Les disques entraînent les aubes qui compriment (au niveau du compresseur) ou détendent (au niveau de la turbine) les gaz. Ils sont principalement soumis à des contraintes mécaniques centrifuges et thermiques cyclées à fréquence faible. Ils sont localement sollicités à des niveaux de contrainte dépassant la limite d'élasticité des matériaux. Ces pièces périssent en fatigue oligocyclique et ont donc une durée de vie limitée (quelques milliers

à quelques dizaines de milliers d'heures). Les effets liés aux températures élevées peuvent induire localement des endommagements mixtes fatigue-fluage.



Disque et aube de turbine en superalliage base Ni



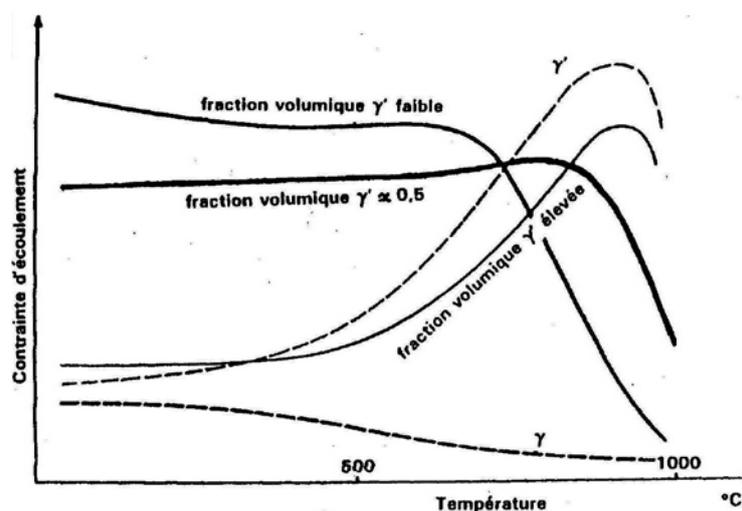
3 – SUPERALLIAGES A BASE NICKEL

Les superalliages à base nickel associent une aptitude remarquable à la mise en œuvre (capacités à être coulés, forgés, traités thermiquement, usinés, soudés, revêtus de couches protectrices...) à des résistances mécaniques à haute température très supérieures à celles de tous les alliages métalliques industriels (aciers, base aluminium, titane, cuivre...). Ils constituent les meilleurs matériaux actuellement développés pour répondre aux problèmes de mécanique-thermique. Ils offrent des caractéristiques métallurgiques très particulières pour expliquer cet ensemble de propriétés. Ce sont des matériaux à matrice base nickel austénitique γ (cubique à faces centrées, donc plutôt ductile) renforcée par des précipités durcissants γ' (de structure aussi CFC, mais de nature atomique ordonnée) cohérente avec la matrice, c'est-à-dire ayant une maille atomique très proche de celle-ci.

Le composé γ' de formulation $Ni_3(Al,Ti)$ présente en outre, de par son caractère ordonné, la propriété remarquable d'avoir une résistance mécanique qui augmente avec la température jusqu'à 800°C environ. La cohérence très forte entre γ/γ' confère une tenue mécanique à chaud très élevée des superalliages à base nickel, qui dépend elle-même du taux de précipités durcissants ce qui a conduit à :

des alliages à forte résistance jusqu'à 700°C, mais dont la résistance diminue fortement au-delà de 800°C , ce qui les rend aptes au forgeage à chaud (au-delà de 1000°C).

des alliages présentant une résistance intermédiaire jusqu'à 700°C et une bonne tenue mécanique vers les très hautes températures (jusqu'à 1100°C) . Ces alliages sont impossibles à mettre en œuvre par voie forgeage. Ils sont utilisés en fonderie de précision.

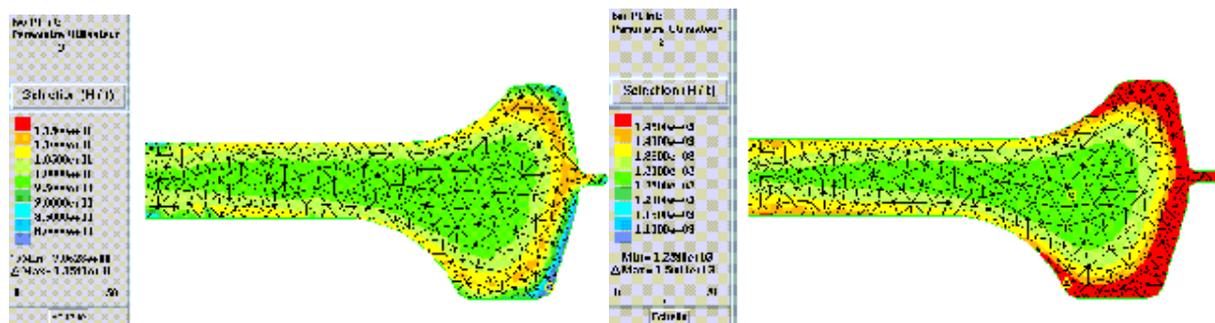


Tenue mécanique des composés γ/γ' en fonction de la température

Il a donc été développé deux classes de superalliages à base nickel répondant aux spécifications précédemment citées.

Les premiers sont utilisés sous forme de pièces forgées, au pilon ou à la presse et sont destinés à des pièces très sollicitées mécaniquement comme les disques et autres pièces tournantes (tourillons, viroles). Outre le durcissement intrinsèque apporté par la teneur en composés γ' , la mise en œuvre thermomécanique permet d'influer notablement sur la taille de grains et le degré d'écroissage des alliages qui en modifient sensiblement la résistance mécanique. La maîtrise de ces microstructures, et au-delà, des propriétés mécaniques de ces matériaux, est un enjeu majeur pour la fiabilité des pièces en fonctionnement, tant du point de vue technique qu'économique. Elle est aujourd'hui largement réalisée, en partie grâce à l'apport de la modélisation des gammes thermo-mécaniques intégrant les aspects rhéologiques (forgeage) et thermiques (traitements de trempe et revenu), auxquels des modèles métallurgiques (permettant la prévision des tailles de grains et niveaux d'écroissage) voire mécaniques (détermination des résistances locales en traction et fatigue oligocyclique) sont couplés.

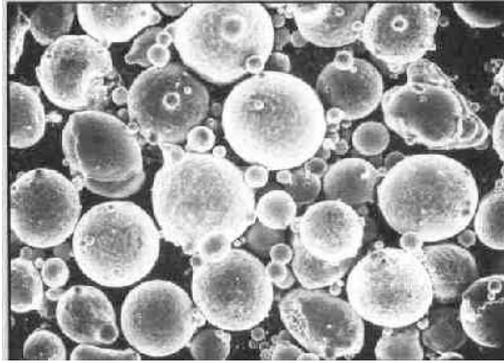
Le superalliage le plus utilisé est de loin l'INCO718 (NC19FeNb) qui a la particularité d'être durci par un intermétallique « cousin » du γ' -Ni₃Al qui est le γ'' -Ni₃Nb dont la précipitation dans la matrice γ est plus lente que celle de γ' ce qui permet une mise en œuvre plus aisée que celle des autres superalliages et un meilleur contrôle de microstructures : c'est l'alliage industriel par excellence pour les turbomachines qui offre un très large spectre d'applications.



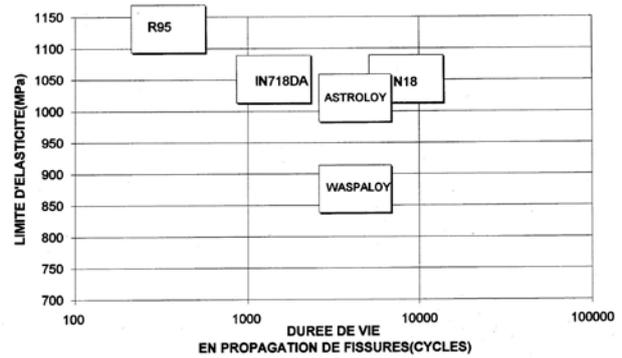
Modélisation du forgeage d'un disque en INCO 718 : microstructure (tailles de grains) et limite d'élasticité à 20°C

Depuis une quinzaine d'années, la mise en œuvre de nuances très chargées en éléments d'addition (donc difficiles à homogénéiser) et à teneur en γ' élevée (vers 50%) ce qui rend le forgeage délicat, a conduit à développer des alliages élaborés par compaction de poudres préallées de taille 50 à 100 μm . Le N18 (NK16CDTA) mis au point en France, est un bon exemple de ces matériaux industrialisés aujourd'hui. Des gammes complexes, pour consolider ces matériaux, par filage puis forgeage isotherme, ont permis d'obtenir des propriétés mécaniques statiques (traction-fluage) très élevées jusqu'à 650-700°C, au-delà de celles obtenues pour les alliages mis en œuvre par voie conventionnelle comme l'INCO 718 pré-cité ou le Waspaloy (NC20K14). Le N18 offre des capacités tout à fait concurrentielles vis-à-vis de superalliages élaborés par métallurgie des poudres (MdP) équivalents tel le R88DT américain. Des travaux sur les microstructures et les compositions chimiques ont été menés ces dernières années pour aboutir à un alliage encore plus résistant pour la fabrication de disques fonctionnant jusqu'à 700°C appelé N19, pouvant rivaliser avec les nuances américaines récemment développées.

Une des difficultés dans la maîtrise de ces matériaux a été le contrôle de la propreté des alliages, c'est-à-dire du taux d'inclusions céramiques entraînées lors de la pulvérisation du jet liquide d'alliage. Ces inclusions, dont l'existence est inhérente au procédé de fabrication, sont en effet sources d'amorçage de fissures lors de sollicitations cycliques (fatigue).



Poudres de N18



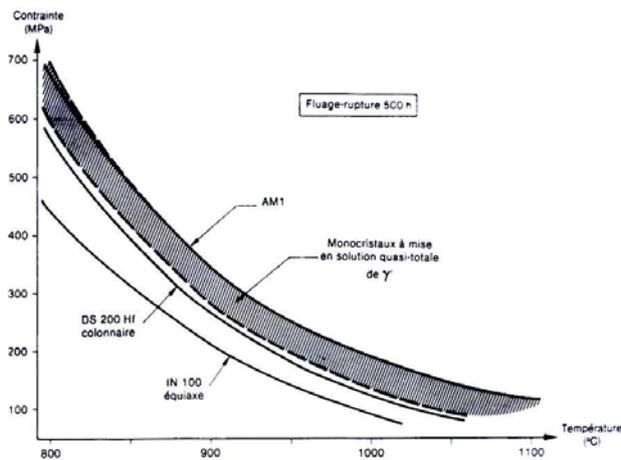
Résistance à la fissuration des superalliages forgés

La présence de ces inclusions fragiles relève d'un taux d'occurrence très faible, ce qui signifie que la probabilité d'en observer dans l'alliage dépend du volume de matière considéré : il s'agit là, par essence même d'un effet d'échelle qui a nécessité, sur le plan mécanique, le développement d'une approche probabiliste pour rendre compte de la nocivité de ces défauts sur pièces. Aujourd'hui, les progrès considérables réalisés par les élaborateurs de poudres ainsi que l'affinement des moyens de contrôle non destructifs permet de garantir la fiabilité des disques élaborés par métallurgie des poudres.

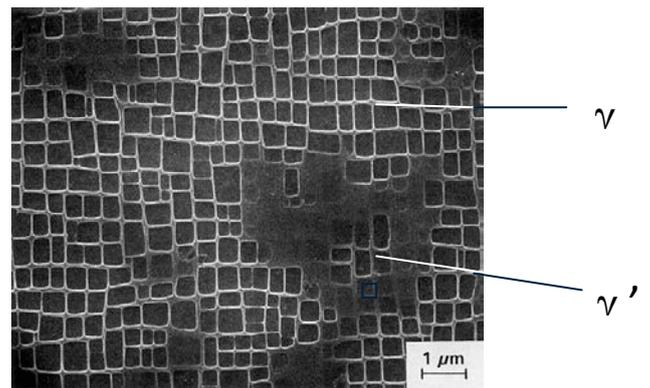
Des travaux sont toujours en cours dans les laboratoires universitaires et chez les industriels pour définir de nouvelles compositions, tant pour des matériaux élaborés par voie traditionnelle du lingot (on peut citer le 718PLUS d'ATI ALLVAC, le René65 de General Electric, l'AD730 d'Aubert&Duval et un alliage japonais riche en cobalt le TMW4, dont il sera fait mention au §4) que par voie métallurgie des poudres : le RR1000 de Rolls Royce, le René88DT pré-cité et le René104 de GE ou le ME16 de Pratt&Whitney en sont quelques exemples. Une autre approche est mise en oeuvre sur les microstructures granulaires avec « l'Ingénierie des joints de grains » qui vise à optimiser ceux-ci sur les plans morphologique, mécanique et chimique pour encore augmenter la résistance mécanique.

L'autre grande famille de superalliages, mis en oeuvre par fonderie de précision, concerne des nuances très chargées en phase durcissante γ' (plus de 60%) présentant les limitations imposées aux matériaux coulés : microstructure plus grossière, pas d'écroissage, défauts de fonderie (porosités...).

Des progrès considérables ont été accomplis ces dernières années pour améliorer les structures et les compositions. L'idée première des métallurgistes était de renforcer, puis supprimer ces points faibles que sont les joints de grains pour la tenue mécanique à chaud. Cela a conduit à la mise en oeuvre industrielle des pièces (telles les aubes de turbines) à grains colonnaires, dans lesquels les joints de grains perpendiculaires à la contrainte principale étaient supprimés, puis monocristallins avec disparition totale des joints de grains. En parallèle, la suppression des joints de grains a permis de diminuer les teneurs en éléments les renforçant tels C, Zr, B, et d'augmenter la teneur en éléments durcissants, et par là même, la résistance à chaud. Des nuances pour solidification monocristalline ont été spécifiquement développées, tel l'AM1 (NTa8CKWA) au début des années 80, breveté conjointement par TECPHY (aujourd'hui Aubert&Duval), ONERA, Ecole des Mines de Paris et SNECMA. Ce superalliage et ses dérivés (AM3, MC2) sont très bien situés dans la palette des superalliages monocristallins dits de première génération, comme le SRR99 anglais ou les alliages américains CMSX2, PW1480 de P&W ou René N4 de GE. L'introduction au cours des années 85-95 d'éléments très réfractaires comme le rhénium, d'abord dans les alliages de 2^e génération avec 3 % en poids puis de 3^e génération avec 6% et ensuite le ruthénium dans une 4^e génération d'alliages monocristallins a permis d'accroître la capacité en température de ce type d'alliage, comme en témoignent le CMSX4 ou le René N5, de 2^e génération, développés aux USA mais aussi d'atteindre les limites de la stabilité métallurgique lorsque le rhénium augmente jusqu'à 6% (exemple le CMSX10 ou le RenéN6 de 3^e génération). L'ONERA a mis au point à la fin des années 90 un superalliage monocristallin de performances équivalentes, voire supérieures, de 4^e génération avec des teneurs en Re et Ru de l'ordre de 4% en poids: c'est le MCNG.



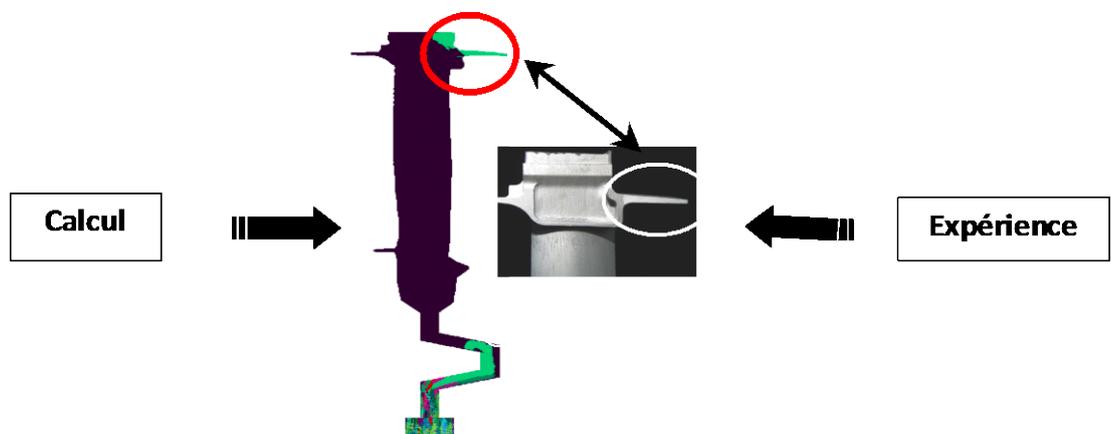
Tenue en fluage des superalliages coulés



Microstructure du superalliage monocristallin AM1

La solidification monocristalline se faisant suivant l'arête de la maille cubique $\langle 001 \rangle$, un fort effet d'anisotropie élastique a pu être mis à profit pour les superalliages monocristallins dans la mesure où le module d'Young est le plus faible suivant cette direction : elle a eu pour effet d'abaisser les contraintes thermiques dans les structures soumises à des gradients de température, et par là même, d'améliorer sensiblement la résistance à la fatigue thermique.

La maîtrise des structures de fonderie suppose un contrôle strict des défauts inhérents à cette technologie : porosités, retassures, ségrégations, grains parasites. Là aussi, la modélisation des processus de solidification a permis des avancées significatives dans l'amélioration de la qualité des pièces et la réduction des taux de rebut.



Modélisation de grains parasites dans une aube coulée en monocristal AM1

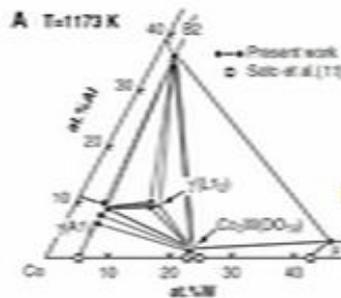
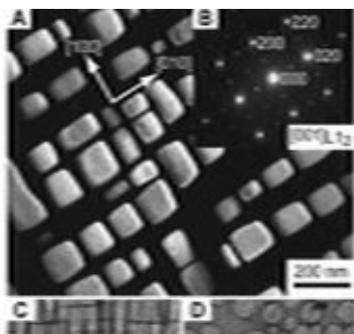
On peut raisonnablement dire qu'aujourd'hui la métallurgie des superalliages est bien maîtrisée et que les caractérisations intrinsèques de ces matériaux sont très complètes. Les problèmes mécaniques rencontrés sur les pièces en superalliage résident principalement dans les couplages entre contraintes-déformations et températures, ce qui engendre des effets de viscoplasticité au niveau du comportement, et d'interaction fatigue-fluage-environnement dans les mécanismes d'endommagement. Des voies expérimentales sont développées pour reproduire en laboratoire les effets anisothermes rencontrés sur pièces, en analyser les conséquences et définir les critères pertinents à prendre en compte dans le dimensionnement. La mise au point d'essais de fatigue thermomécanique répond à ce besoin.

En ce qui concerne de nouvelles compositions, elles sont de plus en plus difficiles à définir suite aux travaux de grande ampleur couvrant la majorité des éléments chimiques utilisables et menés en Europe, aux USA et

surtout au Japon ces 2 dernières décennies. Le laboratoire japonais NIMS (« National Institute for Materials Science ») a mis au point des alliages de 5^e puis 6^e génération, rejoint aujourd’hui par GE, avec des teneurs extrêmes en Re et Ru. La rareté de ces éléments chimiques dans l’écorce terrestre en augmente considérablement leurs prix respectifs (le ruthénium est un platinoïde et le rhénium n’est présent qu’en quantité infinitésimale dans les minerais de cuivre). La résistance exceptionnelle en fluage à très haute température de ces matériaux n’empêche de poser la question d’ordre stratégique et économique sur le bien-fondé de mettre en œuvre ces alliages, et même avec le développement du recyclage, le problème de l’approvisionnement ne doit pas être éludé.

4 – ALLIAGES DE COBALT

Il est connu depuis des décennies que des phases ordonnées de type γ' -Co₃(Al, Ti) peuvent se former dans des matrices de cobalt contenant du titane et de l’aluminium, mais elles sont instables à haute température et ne confèrent pas de bonnes propriétés à chaud à ces alliages. Des études récentes au Japon ont identifié des superalliages à base de cobalt durcis par un composé ternaire possédant une structure L12 précipitant de façon cohérente dans une matrice CFC à base cobalt. Ce composé est de type Co₃(Al, W) et génère donc un système similaire au système γ' – Ni₃Al des superalliages à base de nickel.



Alloy	Composition at. %			Solvus °C	ρ g cm ⁻³	A_f %
	Al	W	others			
Base	7.3	6.8		854	9.18	61
2Mo	7.2	4.7	1.8 Mo	804	8.92	64
2Ta	9.9	4.8	1.8 Ta	992	9.09	42*
2Ta _{#2}	8.4	4.7	1.7 Ta	982	–	–
2Ti	6.3	6.0	2.2 Ti	919	9.16	58
2Ti _{#2}	5.2	5.3	2.0 Ti	921	–	–
20Ni	7.3	7.0	20.2 Ni	881	9.29	50
20Ni _{#2}	6.3	6.4	18.1 Ni	902	–	–

Précipités γ' dans les superalliages base cobalt

Température de solvus γ' des superalliages base Co

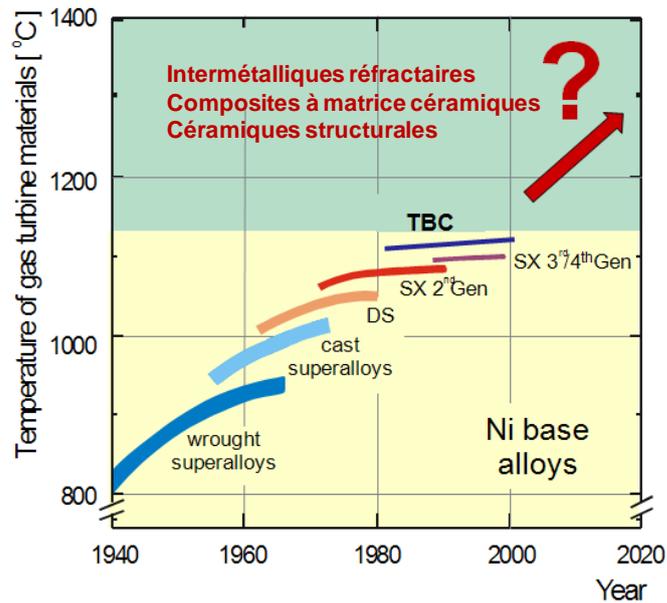
Mais ce dernier composé présente une température de mise en solution sensiblement plus basse que Ni₃Al, inférieure à 1000°C, ce qui interdit la mise au point de superalliages pour très haute température, à mettre en œuvre par voie fonderie, jusqu’à 1200°C, pouvant rivaliser avec les meilleurs superalliages monocristallins base nickel. Des nombreux travaux sont menés aujourd’hui pour augmenter cette température de « solvus » (mise en solution). Une autre voie d’exploration concerne les alliages base cobalt fortement chargée en nickel dans lesquels des composés γ' base Ni ou Co peuvent se former selon les compositions chimiques. Ces alliages à base Co-Ni s’adressent à des applications pour températures modérées, jusqu’à 850-900°C, c’est à dire au dessous des températures de solvus et peuvent être a priori corroyés (forgeage, laminage). Le NIMS a ainsi développé un alliage base Ni chargé à 26% en poids Co, le TMW4 pour réalisation de disques de turbines fonctionnant à 700°C voire plus, en concurrence avec l’alliage américain U720 (NC16KTDA) réputé jusqu’à présent comme étant le meilleur.

Ces alliages ont donc sans doute un potentiel intéressant à préciser mais il faut aussi noter que par leur teneur en tungstène, nécessaire pour la phase durcissante γ' , ils ont des densités plus élevées que celles des superalliages base Ni (plus de 9 contre 8 à 8,4). Il faut aussi avoir en mémoire que si le cobalt, tout comme le nickel, est assez abondant dans l’écorce terrestre, son prix est sensiblement plus élevé que celui du nickel en raison de considérations géostratégiques sur les ressources minières.

5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les métallurgistes ont su répondre, depuis 50 ans, aux défis en termes de tenues mécanique et thermique que leur ont posés les concepteurs de turboréacteurs. Un formidable progrès a été accompli dans la mise au point des matériaux à haute valeur ajoutée pour les pièces les plus critiques, que sont les superalliages de nickel. Les matériaux structuraux de base des turboréacteurs que sont les superalliages de nickel, sont maintenant à un degré de maturité très élevé. La mise au point de nouvelles nuances plus performantes apparaît maintenant difficile dans la mesure où ces matériaux ont atteint des niveaux de performances proches des limites

imposées par la physique et la chimie. Des voies de progrès existent néanmoins et l'effort des métallurgistes et plus généralement des spécialistes des matériaux porte aujourd'hui sur le développement de nouvelles technologies et de matériaux innovants, encore prospectifs.



Les matériaux au-delà des superalliages monocristallins base ni du Futur ?

Pour faire fonctionner des pièces au-delà de 1200°C, il faudra dans le Futur faire appel à des matériaux qui sortiront des alliages métalliques classiques et conventionnels comme le sont les superalliages base nickel. On peut penser à des intermétalliques réfractaires, comme les composés base NbSi, à des composites à fibres et matrices céramiques (les plus avancés aujourd'hui sont les SiC-SiC) ou même à des céramiques structurales à base de mélanges d'oxydes plus ou moins complexes contenant des terres rares. Ces matériaux sont encore très peu connus et un certain nombre de points durs les concernant n'ont pas encore été levés. Il faudra en particulier identifier les procédés d'élaboration et de mise en oeuvre sur des composants qui pourront fort bien être différents des voies actuelles utilisées sur les superalliages que sont le forgeage ou la fonderie.

Les niveaux de maturité de ces solutions sont encore très bas et très éloignés de ce qui est requis pour l'application industrielle : les superalliages base nickel ont encore « de beaux jours » devant eux...