

Aubes de turbines aéronautiques et automobiles

Cette étude utilise la version Aéronautique du logiciel CES EduPack (Aerospace Level 3) pour suggérer des matériaux alternatifs pour la fabrication d'aubes de turbine, pour des applications aéronautiques ou automobiles.

Pour ce faire, nous devons respecter les exigences sur les propriétés des matériaux à utiliser, tels que la température élevée et la résistance à la rupture brutale et au chargement centrifuge. Cette étude s'inspire d'un projet industriel de R&D présenté lors d'une conférence

Le ratio puissance / masse des moteurs est un paramètre particulièrement important pour des applications haute performance dans le domaine aéronautique ou automobile. Par exemple, dans le domaine automobile, la puissance d'un moteur à piston est directement dépendante de la quantité d'air injectée. La suralimentation Turbo vise à augmenter la pression de la tubulure d'admission et la densité du mélange gazeux afin d'augmenter la masse d'air injectée dans les cylindres pendant chaque cycle d'admission. Ceci est réalisé grâce à un turbocompresseur, compresseur d'air mono-étagé à flux radial (« centrifuge »), lui-même entraîné par une turbine à flux radial mono-étagé. La turbine reprend une partie de l'énergie cinétique et thermique du flux de gaz d'échappement haute température en sortie du moteur pour faire tourner le compresseur, ce qui génère une légère perte du rendement de combustion. Ce principe a été largement utilisé dans les moteurs automobiles à partir des années 1970.

Les moteurs d'avions à turbopropulseurs utilisent aussi des turbines à écoulement radial, tandis que les moteurs à réaction possèdent plusieurs types de turbine, fonctionnant à des températures différentes, suivant leur position (et fonction) dans le moteur : fan (à l'avant du moteur, basse température), turbine (en sortie de la chambre de combustion, haute température) et compresseur (à l'arrière de la turbine, température moyenne).

Toutes ces technologies offrent un fort ratio puissance / masse, mais leurs conditions de fonctionnement, très sévères, nécessitent des études poussées pour le choix de la forme et du matériau des aubes de turbine.



© CorkSport Performance

En quoi sont faites les aubes de turbine ?

Un turbocompresseur fonctionne dans un environnement particulièrement hostile. Les gaz d'échappement qui font tourner la turbine peuvent parfois dépasser 1000°C et sont très

corrosifs. Le disque de turbine est situé directement dans le flux des gaz d'échappement, qui sont éjectés à très haute vitesse. On note une expansion du gaz à travers la buse de turbine, ce qui réduit sa température, mais, à l'extrémité du rotor de la turbine, les températures restent très élevées. Les aubes de turbine des réacteurs travaillent dans des conditions similaires, voire même pires, à des températures d'environ 800°C. En outre, le système de rotor sur plusieurs turbocompresseurs tournent à des vitesses supérieures à 100 000 tr/min. La force centrifuge appliquée génère des efforts de traction énormes sur les aubes, en plus des efforts de flexion et des vibrations. On note également la possibilité de chocs thermiques et de fluage sur ces pièces.

Ainsi les turbines sont typiquement fabriquées en superalliages à base de nickel, ces matériaux conservant une haute résistance mécanique même à températures élevées. L'Inconel 713 C et 713 LC sont couramment utilisés pour la fabrication des aubes et les disques de turbines, fabriqués par moulage à la cire perdue, avec éventuellement un traitement isostatique à chaud (HIP) pour améliorer la microstructure, puis un traitement thermique ultérieur pour atteindre la résistance visée.

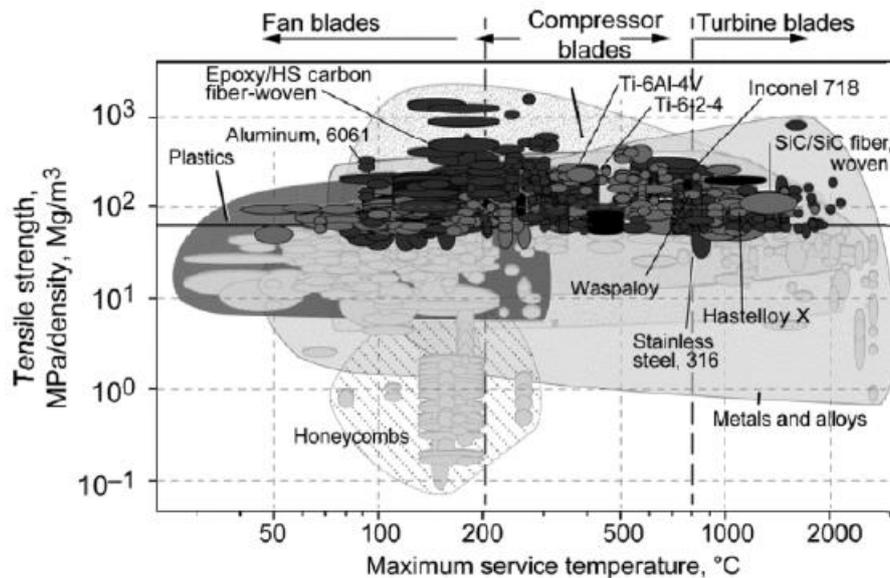
Quelles sont les conditions de fonctionnement des aubes ?

Une aube de turbine est soumise à une force centrifuge très importante, qui constituera l'un de nos facteurs critiques dans le choix du matériau. Les aubes doivent également résister à des efforts de flexion pendant les accélérations de la turbine (phase de démarrage) et aux vibrations générées par le moteur. Cela nécessite d'utiliser un matériau présentant une grande résistance mécanique. D'autre part, la rupture brutale des aubes est à considérer, du fait qu'elles peuvent alors devenir des projectiles, et endommager le moteur. On tiendra compte de ce paramètre au travers de la résistance du matériau à la propagation de fissure (soit sa ténacité). Notre but ici est donc d'identifier un matériau présentant une bonne combinaison de ces deux propriétés (résistance à la force centrifuge et à la propagation brutale de fissures), le tout avec une masse volumique faible (au vu de l'application visée).

De plus, compte tenu des conditions de chargement en service de ces aubes, la résistance à la fatigue est également une propriété à considérer, du fait que les pièces sont amenées à subir des chargements cycliques - le chargement cyclique ne renvoie pas ici à la rotation de la turbine, comme on pourrait le penser, mais plutôt aux efforts causés par les phases de marche / arrêt répétitives, les chocs thermiques consécutifs, etc.

Enfin, le rayon de la turbine (longueur des pales l) est déterminé principalement par des considérations de flux et d'espace, il est donc considéré comme fixé à la conception.

Une étude approfondie des matériaux utilisés pour les aubes de turbine de réacteurs, utilisant les mêmes bases de données et méthodes de sélection, a été publiée par la NASA en 2012. Dans ce travail, les effets de la force centrifuge, des efforts de flexion et des vibrations appliqués aux aubes ont été considérés. Les différentes plages de températures considérées sont indiquées sur le graphique ci-dessous. Il ressort de cette étude que certains superalliages, ainsi que certaines céramiques techniques, qui présentent une bonne résistance mécanique à haute température, ainsi qu'une bonne résistance au fluage et à la corrosion (également à haute température), sont des matériaux envisageables pour remplacer l'Inconel 713 typiquement utilisé.



De notre côté, nous allons reprendre cette étude et rechercherons des candidats alternatifs au matériau Inconel 713 pour la fabrication d'aubes de turbine aéronautique. Nous souhaitons réaliser une étude la plus réaliste possible, mais face la complexité du design et des chargements appliqués aux aubes en service, nous nous concentrerons sur la résistance des matériaux à la force centrifuge, à la rupture brutale et à la fatigue, pour des applications haute température, mais nous ne considérerons pas explicitement les efforts de flexion et les vibrations. De même, nous ne prendrons pas en compte le refroidissement interne, les revêtements / barrière thermique ou les formes monocristallines des aubes.

Dans un premier temps, il vous sera demandé de vous renseigner sur les propriétés des alliages de nickel-chrome et de l'Inconel 713 en particulier, matériau qui nous servira de référence tout au long de cette étude, ainsi que sur la technique du moulage à la cire perdue. Ensuite, vous devrez établir un cahier des charges pour les aubes de turbine aéronautiques, avant de mettre en place la démarche de sélection sur le logiciel CES Edupack version Aerospace, afin d'identifier des candidats potentiels pour remplacer l'Inconel pour la fabrication de ces pièces.

Cahier des charges :

- **Fonction :** aubes de turbines rotatives, pour turbocompresseur aéronautique ou automobile. Les aubes de longueur l , fixée, tourne à grande vitesse, avec une vitesse angulaire variable. La résistance mécanique et à la fatigue sont considérées.
- **Contraintes :**
 - limite de fatigue (contrainte min pour N de 10^7 cycles) = 360MPa
 - stabilité thermique en service $> 900^\circ\text{C}$
 - résistance à l'oxydation à haute température = excellente
 - seuls les métaux et les céramiques techniques sont à considérer
 - les métaux doivent être mis en forme par moulage à la cire perdue
- **Objectifs :** maximiser la résistance à l'application d'une force centrifuge et résistance à la rupture fragile (brutale)

Procédure de sélection :

On va se placer dans la base de données des matériaux pour l'aéronautique, et on va imposer les critères résumés dans le cahier des charges (contraintes), et regarder quels matériaux sont capables de respecter les objectifs définis.

- 1) Au niveau de l'arborescence, on commence par imposer les matériaux retenus dans l'univers des matériaux, tout en précisant que si c'est un métal qui est retenu, il doit pouvoir être mis en forme par moulage à la cire perdue Dans la base de données des matériaux : Céramiques et verres > Céramiques techniques + Métaux et alliages ; et dans la base de données des procédés : Mise en forme (Shaping) > Fonderie (Casting) > Moulage à la cire perdue (Investment)
 - ⇒ Sur les 4026 matériaux proposés dans la base de données du logiciel (niveau 3 Aéronautique), on a 1898 matériaux qui sont validés (qui passent les premiers critères de sélection par arborescence)
- 2) Au niveau des limites, on va renseigner la limite de fatigue : Propriétés mécaniques > Résistance à la fatigue à 10^7 cycles : min = 360MPa + la température max de service : Propriétés thermiques > Température minimum en service = 900°C + le niveau de résistance à l'oxydation : Oxydation à 500°C = excellent. On peut aussi préciser que le matériau doit être massif (Composition overview > Form > bulk materials)
 - ⇒ Il ne reste plus alors que 108 matériaux disponibles dans la base de données, parmi lesquels 16 céramiques techniques, et parmi les métaux les Inconel 713 et 713L
Si on augmente la température de service à 1000°C, on ne retient plus que 76 matériaux (et plus les deux Inconel précédemment cités !)
- 3) On va maintenant appliquer les critères correspondant aux objectifs de cette sélection, à savoir maximiser la résistance à l'application d'une force centrifuge et la résistance à la rupture fragile. Une visualisation sous forme de graphique, à partir des indices de performances liés à ces deux critères (disponibles pour les géométries des aubes de turbines dans la version aéronautique du logiciel), permettra de discriminer rapidement les matériaux retenus. Pour cela, dans l'onglet Graphique > Aes des abscisses, sélectionnez Recherche des indices de performances, dans Fonction de chargement : Rotating blade, et dans optimiser par exemple le 1^{er} critère, à savoir la résistance à la force centrifuge, soit $M_1 = \sigma_c/\rho$, et le second critère de la même façon sur l'axe des ordonnées, soit la résistance à la rupture fragile $M_2 = K_{IC}/\rho$
 - ⇒ On s'aperçoit ainsi que, comme on s'y attend, les métaux retenus présentent une meilleure résistance à la rupture fragile que les céramiques techniques (les céramiques sont réputées pour être fragiles), mais les céramiques présentent une meilleure résistance au chargement centrifuge. De plus, les alliages à base Ni (et certains aciers inox austénitiques) pourraient constituer une meilleure option que le superalliage de référence Inconel 713, du moins pour ce qui concerne la résistance à la rupture fragile (leur résistance à la force centrifuge étant équivalente). Enfin, on écartera le diamant, qui apparaît dans les solutions céramiques, pour des raisons évidentes de coût.
- 4) Si on s'intéresse cette fois à la résistance en fatigue des aubes, ce critère ne figure pas comme option dans les indices de performances liées à la géométrie « aubes de turbine ». On va donc revenir aux critères matériaux classiques, et demander à tracer un graphique présentant en abscisses la limite de fatigue et en ordonnées la ténacité
 - ⇒ La ténacité des céramiques techniques reste leur « point faible », avec des valeurs inférieures à un ordre de grandeur par rapport à la solution actuelle en Inconel 713, malgré des performances de résistance à la fatigue compétitives. La meilleure performance en termes de ténacité et résistance à la fatigue pour une céramique est obtenue avec le nitrure de silicium avec 5 % de MgO.
- 5) Considérons maintenant des températures maximales en service supérieure, 1000°C et 1100°C par exemple. On va reprendre les mêmes critères de sélection, en changeant la température maximale de service.
 - ⇒ On s'aperçoit alors que plus la température maximale en service augmente, plus le nombre de candidats potentiels métalliques diminue (l'Inconel 713 n'est plus retenu dès 1000°C, et par exemple les alliages de Ni-W disparaissent dès 1000°C, les alliages de Ni-Cr dès 1100°C) alors que les céramiques techniques sont toujours validées à de telles températures.
- 6) Un dernier critère auquel on doit s'intéresser ici, même s'il n'apparaît pas comme critère principal dans notre étude, est le coût. Pour cela, on va travailler avec l'indice de performance $M_3 = C_m \times \rho$, qui représente le prix volumique (le volume de l'aube étant fixe (on a fixé sa longueur comme critère), ce critère permet donc une comparaison rapide entre les matériaux, sans avoir à déterminer la masse exacte

de la pièce). On demandera à tracer un graphique présentant le coût M_3 en fonction des catégories de matériaux retenus.

- ⇒ Les nitrure de silicium apparaissent comme les plus couteux des céramiques techniques, mais restent compétitifs si on compare avec le prix de l'Inconel. Bien évidemment, le diamant et le saphir sont à éliminer de la sélection, du fait de leur coût beaucoup trop élevé.

En conclusion, on peut retenir de cette étude que :

- Quelques céramiques techniques montrent des résistances à la force centrifuge (critère M_1) et à la fatigue supérieures à celle des superalliages, mais des résistances à la rupture fragile (ténacité) inférieures d'au moins un ordre de grandeur (critère M_2).
- Parmi les céramiques techniques (exception faite du diamant), les nitrures de silicium pressés à chaud avec 5% de MgO présente la meilleure combinaison de performances. Cependant ces matériaux font partie des céramiques les plus chères, mais leurs prix restent compétitifs avec ceux des superalliages actuellement utilisés.
- Si on change la température maximale en service de 900°C à 1100°C, la sélection retient toujours les céramiques techniques comme matériaux possibles pour les aubes de turbines, mais les métaux retenus sont de moins en moins nombreux. L'inconel 713, matériau de référence ici, a une température maximale de service de 900°C.

Le matériel proposé, le nitrure de silicium, est le même matériau céramique que celui proposé par Ingersoll-Rand Energy Systems et le Kyocera Research Center lors un projet R&D en collaboration avec des instituts de recherche américain et le ministère de l'énergie pour la production d'électricité turbines. Le nitrure de silicium a également été présenté comme remplacement potentiel de l'Inconel lors de la conférence Composites, Materials dans Structures en 2003. On peut enfin signaler une recherche constante dans l'industrie aérospatiale pour développer des nouvelles solutions en céramique pour le remplacement des superalliages dans les applications de la turbine.