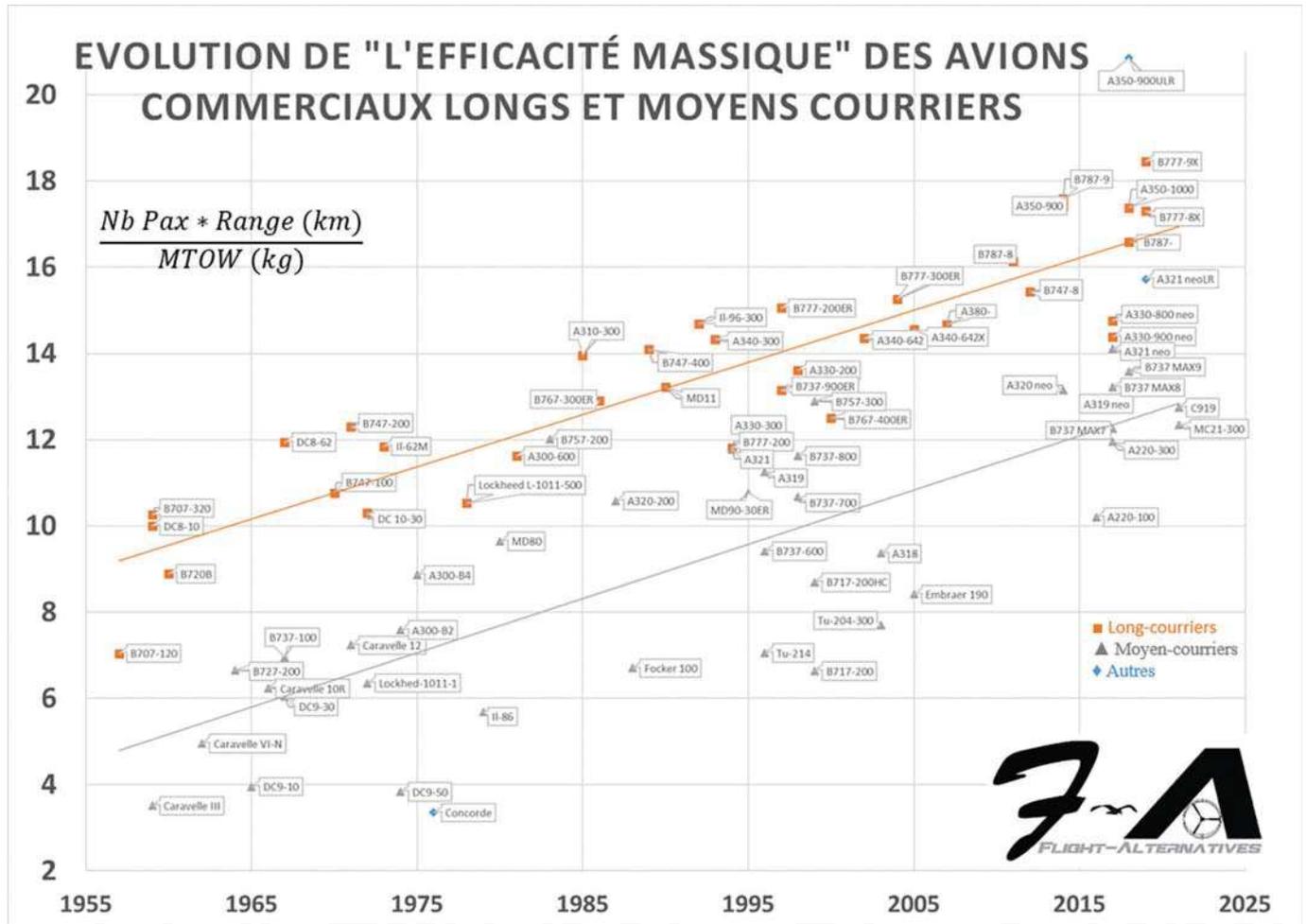


Évolution des matériaux : la diète permanente



Une tribune signée Jean-Michel Schulz, professeur en technologies aéronautiques à la Haute école spécialisée de Suisse occidentale et à l'EIGSI de La Rochelle.

Depuis son origine la plus ancienne, l'aviation lutte contre la masse. De fait, plus que pour toutes autres disciplines, les matériaux y sont poussés dans leurs ultimes retranchements. On assimile souvent le gain de masse à la légèreté des matériaux utilisés. La réalité est plus complexe, c'est en effet le rapport (caractéristique recherchée/masse volumique), qu'il convient d'optimiser. C'est ainsi que chaque kilogramme offrira le maximum de résistance possible, en fonction du type

de charge auquel il est soumis. Naturellement, la sécurité omniprésente et en constante amélioration impose sans discussion possible ses propres limites et exigences. Par conséquent, cet exercice nécessite une connaissance fiable et scientifique des matériaux, de leurs caractéristiques, de leurs élaborations, de leurs vieillissements, ainsi que la connaissance précise et absolue des contraintes statiques, thermiques et dynamiques, auxquelles les pièces structurales sont soumises durant toute leur durée de vie.

Comme l'exprimait l'un des fondateurs de la British Aviation Insurance, Alfred Gilmer Lamplugh : « *L'aviation en soi n'est pas intrinsèquement dangereuse. Mais dans une*

mesure encore plus grande qu'en mer, elle est terriblement impitoyable de toute imprudence, incompétence ou négligence. »

Ces configurations audacieuses et validées peuvent parfois conduire à un certain immobilisme et mimétisme de la conception. Mais la recherche de la performance est inhérente au secteur de l'aéronautique. Lorsque ce n'est pas pour des raisons purement techniques ou encore pour une suprématie aérienne militaire, il s'agit là d'un impératif de survie économique de l'aviation commerciale. Et lorsque l'optimisation n'est plus suffisante, l'innovation de rupture la supplante rapidement. On constate l'amélioration constante et progressive de « l'efficacité massique » des avions commerciaux de configurations contemporaines, depuis 1955.

En première analyse, on pourrait supposer que l'augmentation soit due à celle des rendements thermopropulsifs et donc à l'emport de moins de carburant pour une même mission. Comme expliqué plus loin, ces accroissements de rendements ne sont également pas étrangers à l'amélioration des matériaux, en particulier la capacité d'augmenter le taux de dilution, les taux de compression et la température entrée turbine. Mais le fait que les régressions linéaires soient quasiment parallèles entre les avions long-courriers et les moyens courriers, nous permet d'identifier sans équivoque une amélioration fondamentale de la finesse aérodynamique et de la performance massique des structures des avions.

Le couplage et l'optimisation des phénomènes aérodynamiques et simultanément de ceux de la résistance des matériaux ont donné naissance à une nouvelle discipline, nommée « aéroélasticité », et dont les résolutions passent systématiquement par des solutions numériques d'envergures. En premier lieu desquelles, on peut observer par exemple, le changement fondamental de philosophie de la conception des ailes, d'extrêmement rigide dans les années 1960, à fortement flexible pour les applications modernes. Cette souplesse, qui consiste à autoriser les fortes déformations, a été rendue possible par une meilleure appréhension des phénomènes de plasticité et de fatigue. Quant aux ailes de demain, bio-inspirées du vol des grands rapaces, elles seront non seulement encore plus flexibles, mais également capables de se cambrer considérablement et aussi de vibrer à différentes fréquences, à l'aide de matériaux électroactifs appelés « Alliages à Mémoire de Forme ».

Encore plus de matériaux composites

Mais revenons à des technologies validées. La maturité des matériaux composites et particulièrement des matériaux composites performants à base de fibre de carbone a permis et permet encore des gains de masse de l'ordre de 30% sur les pièces métalliques équivalentes. À cela s'ajoute le fait que ces matériaux ne sont pas sujet à la corrosion et peu sensibles à la fatigue au regard des matériaux métalliques qui nécessitent

Beruf fluid AS 1008*

- *• Spécial Ti, Al, Inconel
- Sans huile minérale
- Pouvoirs lubrifiant et extrême pression x 2,5

BECHEM – Solutions de lubrification pour l'industrie.



des suivis réguliers. Cependant, les matériaux composites à matrice thermodurcissable connaissent une diminution de leurs propriétés par reprise d'humidité et surtout un risque d'endommagement par choc. Si la reprise d'humidité conduit à un « simple » surdimensionnement, la tolérance aux dommages d'impact est un cas très dimensionnant pour les structures composites aéronautiques. Des méthodes probabilistes permettent de dimensionner ces cas complexes, pour lesquels il faut considérer simultanément la chute de tenue résiduelle due à l'impact, sa détectabilité, son indentation permanente et son évolution prévisible. L'ajout de matières thermoplastiques à cœur du matériau, sous forme de poudres ou de voiles, améliore cette tenue.

Mais depuis les années 2000, un nouveau facteur est venu conforter la position des matériaux composites, celui du prix. Les matières premières ont fortement diminué. Les technologies d'étalement des fibres et les « Non Crimp » ont permis d'augmenter la taille des brins, donc diminuer les coûts et les masses surfaciques, voire même de s'affranchir des fils de trame en éliminant l'embuvage intrinsèque aux tissus. L'industrialisation des procédés de fabrication a également permis de diminuer les coûts de mise en œuvre des pièces avec le développement de moyens automatisés, tels que les machines à bobiner, à draper, ou encore les robots de placement de fils. Les systèmes de contrôles vidéo permettent de surveiller et de garantir la qualité, l'orientation des fibres, les « gaps » entre fibres ou UD, le nombre de couches et l'éventuelle présence de corps étrangers. L'introduction des méthodes de fabrication d'injection ou d'infusion des résines dans des préformes fibreuses 2D ou 3D permet également une réduction des coûts, une augmentation des cadences et la fiabilisation du taux de fibres. De fait, les surcoûts de la matière de base par rapport à l'aluminium sont rapidement compensés par les gains de déchets matière (souvent plus de 70% de copeaux sur une pièce de structure aéronautique usinée), de mise en forme, d'assemblage sur avion et de maintenance en service.

Les conditions de stockages (température et sécurité) et de transport des résines thermodurcissables ou des pré-pregs associés, ainsi que leurs faibles durées de péremption, complexifient grandement la chaîne logistique de ces produits. L'agilité et la flexibilité de la supply chain globale en sont impactées. Pour autant, ces matériaux continueront à augmenter leur part de marché. L'avenir passe certainement par les matrices thermoplastiques. En effet, ces dernières ne nécessitent pas de conditions de stockage aussi drastiques, leur mise en œuvre est plus simple et moins coûteuse, la résistance aux chocs est accrue, l'assemblage autorise le soudage, enfin ces matériaux peuvent plus facilement être recyclés.

Des matériaux toujours plus chauds

Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes propulsifs ont également bénéficié d'amélioration des matériaux.

Les principales familles de pièces des turboréacteurs ? Les pièces tournantes « froides » : disques de compresseurs basse et haute pression, soumis à des températures ne dépassant que rarement 500°C et dimensionnés en fatigue oligocyclique. Les carters structuraux : soumis à des contraintes thermiques de l'ordre de 700°C pour les parties les plus chaudes, statiques et dimensionnés en fatigue vibratoire.

Les pièces fixes et mobiles de turbines : soumises à très haute température allant jusqu'à 1 500°C. Elles sont le plus souvent dimensionnées en fluage.

Si l'on excepte les soufflantes, qui elles aussi ont tendances à évoluer vers des aubes en préformes fibres de carbone, les principales avancées portent sur les parties chaudes, directement responsables de l'augmentation des rendements thermodynamiques. On parle même de 2 000°C en continu pour la future partie chaude développée par Safran sur la base du M88 pour le prochain avion de chasse européen SCAF.

Pour tenir ces contraintes, il faudra faire appel à des matériaux, tels que des intermétalliques réfractaires, des composites à matrices céramiques ou encore à base de mélanges d'oxydes. Ces avancées permettront peut-être même de supprimer les énergivores prélèvements d'air de refroidissement. Sur les aubes de turbine HP, on utilise actuellement en fonderie cire perdue, des superalliages monocristallins. L'augmentation des performances de ces alliages a conduit à augmenter fortement leur durcissement et à les charger en bore, zirconium et du hafnium pour limiter la fissuration lors de la solidification. Les disques de turbines eux, sont soumis à des températures plus faible de l'ordre de 800°C maximum, mais à des contraintes

Jean-Michel Schulz.



maximales bien plus fortes de l'ordre de plus de 1 000 MPa, voire 1 900 MPa pour certains moteurs militaires. Ils sont réalisés avec des superalliages base nickel polycristallins. Certains développements font état de cobalt. Les modalités de mise en œuvre par forgeage, de plus en plus critique sur ces matériaux fortement durcis, sont passées du forgeage traditionnel au forgeage isotherme et pour certains, à partir de semi-finis issus de la métallurgie des poudres. Ces matériaux nécessitent également d'adapter les méthodes d'assemblages, par exemple par soudure à faisceaux d'électrons ou encore par friction inertielle.

La maturité de la fabrication additive

Longtemps relayé aux activités de prototypage, les technologies de fabrication additives offrent une alternative industrielle particulièrement intéressante dans le secteur aéronautique qui se caractérise par de petites séries de pièces à haute valeur ajoutée. Les développements de pièces en fabrication additive permettent la réduction des masses à l'aide de matériaux poreux ou des structures treillis et grâce à l'optimisation topologique ; la réduction des coûts par l'absence d'outillages et la minimisation de la matière mise en œuvre ; la réduction des assemblages, l'accélération et la flexibilité de la chaîne logistique et la diminution des stocks intermédiaires, y compris dans le cadre des pièces de rechange en maintenance.

Une fois les matériaux usuels sous forme de poudres validés au niveau de leurs gammes de fabrication et de post-traitement, se développeront de nouveaux alliages qui permettront d'utiliser toutes les potentialités de ces technologies, par exemple l'augmentation du durcissement de microstructures fines et métastables. Face à ces nombreuses opportunités, il est certain que les procédés additifs sont amenés à se développer rapidement dans l'aéronautique, particulièrement pour de grandes structures en treillis, les pièces à canaux internes de refroidissement ou de lubrification, ou encore pour l'intégration de capteurs embarqués au cœur des pièces.

En conclusion, la recherche permanente de la performance des avions influence fortement le développement et l'optimisation des matériaux. Ces développements simultanés des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre, doivent s'intégrer dans la chaîne globale d'analyse de la valeur, de la conception à la production, en passant par la supply chain puis à la maintenance et le démantèlement. Naturellement, ces nouveaux procédés spéciaux doivent satisfaire les exigences de certification et mettre en place les outils de suivi de production conformes aux normes qualité EN-9100 et Nadcap.

Jean-Michel Schulz

Responsable de la filière ingénierie et gestion industrielles de la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (Suisse), professeur en technologies aéronautiques à la Haute école spécialisée de Suisse occidentale et à l'EIGSI de La Rochelle.

Ce qu'il y a d'exceptionnel entre nous :
C'est l'Effet MAPAL.



Vous

développez des solutions
aujourd'hui plus innovantes
pour faire décoller vos
performances.

Prendre
son envol

Nous

vous proposons des
solutions d'usinage pour
que votre production prenne
de l'essor avec de nouveaux
matériaux.

