

Turbines et moteurs à réaction

PRINCIPE D'ACTION ET RÉACTION



Ce n'est qu'au cours des années 1930 que les ingénieurs en propulsion aéronautique se penchent sur la conception de moteurs à réaction pour l'aviation. Pourtant, le scientifique anglais Isaac Newton avait énoncé dès 1687 le postulat physique classique qui sous-tend leur fonctionnement, le principe des actions réciproques, ou principe d'action-réaction : « tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, mais de sens opposé, exercée par le corps B ». Suivant ce principe de la physique classique, un passager à bord d'un corps mobile qui projette une masse donnée dans une certaine direction met le mobile en mouvement dans le sens opposé au lancer : il s'agit donc bien d'un moyen de propulsion ! On appelle moteur à réaction un moteur qui fournit une poussée en réaction à la propulsion d'un corps (comme un ballon de baudouche gonflé qui se met en mouvement en éjectant l'air qu'il contient).

Le principe des moteurs à réaction utilisés en aéronautique et en astronautique consiste à profiter du phénomène physique d'action et de réaction, en se servant notamment de gaz issus d'une réaction chimique. Il existe des moteurs à réaction de tous types et d'utilisations extrêmement variées, équipant une large gamme d'aéronefs, depuis les petits monomoteurs d'entraînement (turbopropulseur) jusqu'aux sondes et lanceurs spatiaux (moteurs-fusées, moteur ionique ou statoréacteur), en passant par les avions de chasse ou les long-courriers des compagnies aériennes. Ces derniers sont munis, dans leur grande majorité, du modèle le plus répandu de réacteur : le turboréacteur.

s'approchent de plus en plus du mur du son, engendrant turbulences et instabilités qui détruisent les pales ! Confrontés pour la première fois à ce problème, les ingénieurs aéronautiques se mettent à la recherche d'un moyen de propulsion plus efficace.

INVENTION

L'idée de moteur à réaction est alors déjà dans l'air depuis longtemps : l'anglais John Barber dès 1791 et le français Charles de Louvrié en 1863 avaient déposé un brevet de turbine à gaz. Il faut cependant attendre 1903 et les travaux du norvégien Aegidius Flink pour voir construire la première turbine à gaz auto-entretenu. De graves problèmes de fiabilité et de poids empêchent encore les ingénieurs d'envisager l'utilisation aéronautique de ces moteurs. C'est au début des années 1930 que le principe du turboréacteur, conçu pour être adapté à l'aviation, a été inventé, simultanément, et semble-t-il de façon indépendante, par l'ingénieur



Sir **Frank Whittle** au Royaume-Uni et le Docteur Hans von Ohain en Allemagne.

PREMIER VOL À RÉACTION

En Allemagne comme en Angleterre, il faut attendre 1937 pour voir un prototype de turboréacteur fonctionner. Cependant, le constructeur aéronautique le plus prompt à entrevoir les potentialités du turboréacteur est l'allemand



mais au kérosène) à une cellule de Heinkel He 178. Le premier vol à réaction a lieu le 27 août 1939 à Marienehe (Allemagne), avec le pilote d'essai Erich Warsitz aux commandes. Le premier vol à réaction britannique, réalisé en arrivant le prototype W1 (4 kN de poussée) de Whittle à une cellule de Gloster E28, n'aura lieu qu'en mai 1941, après que le Ministère de la Guerre britannique a décidé de

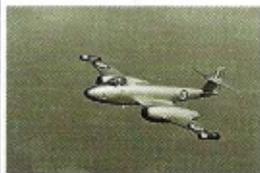
rattraper le retard accumulé. Le premier avion à réaction construit en série est lui aussi allemand : il s'agit du **Messerschmitt Me 262**, utilisé



par la Luftwaffe à la fin de la Seconde Guerre mondiale ; mais celui-ci entre en action trop tardivement pour modifier le déroulement de la guerre.

L'INNOVATION CONTINUE

Après-Guerre, le développement des moteurs à réaction se poursuit avec la généralisation des turboréacteurs, dans le domaine militaire (**Gloster Meteor britannique**, Triton



français et MiG 9 soviétique en 1946) comme dans le monde du transport aérien commercial (De Havilland Comet britannique en 1953, Caravelle française en 1955 et Boeing 707 américain en 1958). Les recherches se multiplient aussi pour mettre au point de nouveaux types de moteurs à réaction, tels le statoréacteur du Leduc français ou les moteurs-fusées du prototype américain Bell XS-1, premier avion à dépasser le mur du son le 14 octobre 1947. Enfin, le travail continu de recherche et d'innovation des

ingénieurs a rendu depuis lors les turboréacteurs plus légers, plus puissants, plus fiables, plus silencieux et plus économes.

LES TURBORÉACTEUR

Un **turboréacteur** produit sa poussée en propulsant, en sortie de



sa tuyère d'éjection, du gaz porté à haute température (combustion) et haute pression (compression). La combustion est réalisée par injection de kérosène dans le flux d'air entrant (chambre de combustion). Un compresseur situé à l'entrée du réacteur permet de porter le flux d'air à haute pression : ce compresseur est entraîné par une turbine située en sortie du réacteur, elle-même mue par les gaz propulsés dans la tuyère d'éjection, ce qui assure un fonctionnement auto-entretenu du moteur. Le flux d'air entrant est aspiré par le compresseur, et porté à haute pression dans la chambre de combustion. Là, la combustion est entretenue par une injection permanente de kérosène : le flux d'air est donc porté à haute température. Dans la tuyère d'éjection du réacteur, le flux d'air chaud à haute pression est propulsé par détente gazeuse, action qui en réaction fournit une poussée au réacteur. Au passage, le flux d'air entraîne une turbine, qui fournit de

l'énergie au compresseur pour entretenir le fonctionnement du moteur.

COMPRESSION

Le comburant de la réaction chimique au sein du turboréacteur étant l'air, le problème de l'approvisionnement en comburant ne se pose pas en aéronautique, puisque du fait du déplacement de l'avion dans l'atmosphère les réacteurs reçoivent un important flux d'air. Par contre, la compression du flux d'air est indispensable à un fonctionnement optimal. Les premiers réacteurs utilisaient tout simplement un compresseur centrifuge, c'est-à-dire une turbine en rotation munie d'ailettes qui accélèrent le flux d'air vers l'extérieur de la carène du moteur. Très rapidement, ce type de compresseur s'est avéré limité : on utilise depuis des compresseurs axiaux, c'est-à-dire des sortes d'hélices munies de nombreuses pales très resserrées, qui compressent le flux d'air parallèlement à l'axe du moteur et non plus de façon radiale. Pour augmenter l'efficacité de ce type de compresseur, on construit aujourd'hui des moteurs dits à double ou triple corps, disposant d'une série de deux ou trois couples turbine-compresseur imbriqués, correspondant chacun à une pression différente du flux d'air (on différencie alors le compresseur « basse pression » en entrée, puis les compresseurs « moyenne pression » et « haute pression »).

INJECTION

L'injection de carburant dans la chambre de combustion a pour but

Une puissance énorme

900
Nombre moyen d'oiseaux ingérés par des turboréacteurs chaque année dans le monde.

1/3
Le prix des turboréacteurs atteint près d'un tiers du prix total d'un avion de ligne.

34 400 kN



Poussée en kilonewton (kN) des réacteurs du lanceur Saturn V.

15 130 kN



Poussée des réacteurs d'Ariane 5.

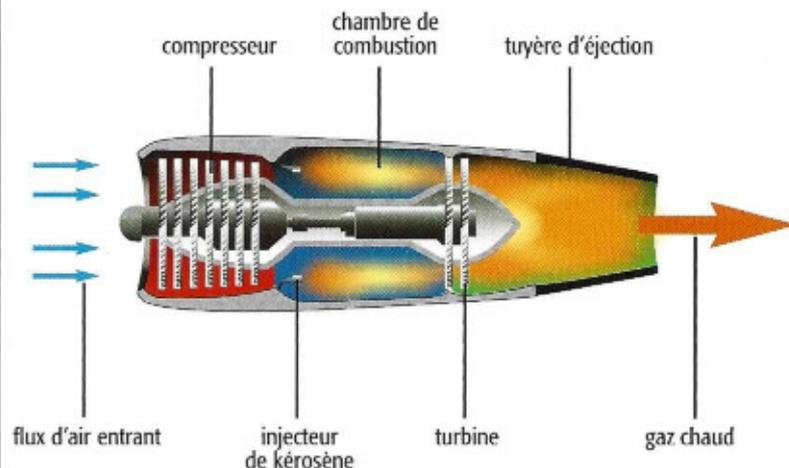
690,4 kN

Poussée des réacteurs du Concorde.

333 kN

Poussée des réacteurs de l'Airbus A380.

Le turboréacteur



Le Concorde



450 L
de kérosène par minute au décollage

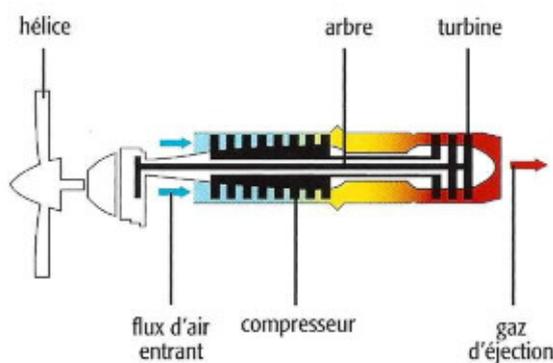
Une consommation record

HISTOIRE

PREMIÈRE CONFRONTATION AU MUR DU SON

Dans les années 1920, l'aviation progresse à pas de géants. À force de concevoir des moteurs de plus en plus puissants pour équiper des aéronefs de plus en plus rapides, les vitesses atteintes par l'extrémité des pales des hélices à plein régime

Le turbopropulseur



d'entretenir la combustion du flux d'air, qui est ainsi porté à haute température. Le carburant aéronautique majoritairement utilisé est le « Jet A1 », carburant fabriqué à base de kérosène (un produit de la distillation du pétrole). Le choix du carburant s'est porté sur le kérosène du fait d'une part de sa forte



densité énergétique (plus fort emport énergétique à masse égale qu'un autre carburant), et d'autre part de son point de congélation très bas (de l'ordre de -54°C) : les températures en altitude pouvant descendre à -65 ou -70°C , mieux vaut éviter que le carburant gèle trop vite dans les réservoirs... En contrôlant le débit de l'injection de carburant via la manette des gaz, le pilote peut modifier la température des gaz en combustion, et donc la poussée de chacun des réacteurs.

ENTRÉE ET SORTIE D'AIR

L'entrée d'air du réacteur est la partie avant du moteur, constituée de la soufflante du compresseur (le premier étage du compresseur basse pression) et d'une tuyère plus ou moins longue d'admission du flux d'air. Autant la conception d'une entrée et d'une sortie d'air ne pose pas de problèmes particuliers dans le domaine de l'aviation subsonique, autant le passage du mur du son impose un certain nombre de précautions aux ingénieurs. En effet, pour assurer un fonctionnement optimal des compresseurs et des turbines du turboréacteur, l'écoulement fluide interne doit présenter le moins de turbulences possible ; or ces phénomènes apparaissent justement de façon incontrôlée lorsque la vitesse du flux d'air s'approche de celle du son. Les ingénieurs ont donc dû mettre au point des dispositifs permettant de ramener le flux entrant à des vitesses subsoniques (par exemple les cônes d'ondes de choc sur réacteurs hémisphériques), et à l'inverse de transformer en vitesse la chaleur et la pression de l'air chaud à la sortie du réacteur (par exemple les tuyères de Laval qui accélèrent le flux d'air jusqu'à des vitesses supersoniques grâce à leur profil).

SIMPLE ET DOUBLE FLUX

On parle de moteur « simple flux » pour désigner un turboréacteur au sein duquel la totalité du flux d'air entrant traverse la chambre de combustion et est chauffé puis détendu pour provoquer la propulsion. Au cours des années 1960 sont apparus des moteurs dits « double flux », dans lesquels une partie seulement du flux d'air pré-compressé par la soufflante traverse le moteur : le reste est dévié de façon à contourner la chambre de combustion par sa périphérie jusqu'à la tuyère, où il est éjecté avec les gaz chauds. La proportion d'air contournant le moteur est variable : on parle alors de taux de dilution pour désigner le rapport du flux massique total (air chaud et air froid) sur le flux massique traversant le moteur (air chaud seulement). Les moteurs simple flux ou à faible taux de dilution sont très bruyants et n'atteignent un rendement optimal qu'au-delà de Mach 1 : particulièrement adaptés au vol supersonique, ils conviennent donc aux avions militaires (un taux de dilution typique pour un chasseur moderne est de l'ordre de 1,5). À l'inverse, les avions de ligne, qui dépassent rarement Mach 0,85, sont en général dotés de moteurs double flux à fort taux de dilution (de l'ordre de 5 à 10), plus silencieux, plus économiques, atteignant leur rendement optimal à des vitesses plus faibles, et reconnaissables à la taille conséquente de leur soufflante, de grande dimension pour pouvoir aspirer un gros flux d'air.

L'HYBRIDE : LE TURBOPROPULSEUR

On parle indifféremment de turbopropulseur ou de moteur à turbine pour désigner ce moteur hybride, qu'on peut voir comme une hélice greffée sur un réacteur ! Il s'agit plus précisément d'un type spécial de turboréacteur dans lequel la majeure partie de l'énergie des gaz d'éjection est transférée, via une turbine, à une hélice. La poussée n'est donc pas obtenue par réaction, mais bien grâce à la puissance transmise par les gaz éjectés à l'hélice via l'arbre de la turbine. Ce type de moteur équipe un grand nombre d'appareils de moyenne puissance, pour lesquels les moteurs classiques à pistons ne sont pas assez performants mais les turboréacteurs inadaptés : par exemple, les avions de

transport tactique militaire, qui doivent pouvoir opérer sur piste courte (C-160 Transall, C-130 Hercules), les avions-écoles (Lucano), les petit-porteurs court et moyen-courriers (Beechcraft King Air 200). Les performances des turbopropulseurs leur interdisent de dépasser Mach 0,7.

PLUS QU'UN MOTEUR

GÉNÉRATEUR DE PUISSANCE

Sur les avions civils, l'APU (Auxiliary Power Unit) est une turbine à gaz auxiliaire, située en général à l'arrière de l'appareil au niveau de la gouverne de profondeur, qui fonctionne en brûlant le kérosène des réservoirs pour alimenter les circuits électriques et électroniques de l'avion. En vol, les turboréacteurs principaux eux-mêmes peuvent aussi jouer ce rôle. Ainsi, en plus de leur rôle moteur, les réacteurs de l'avion se comportent comme des générateurs de puissance électrique.

POUSSÉE VECTORIELLE

Le combat aérien moderne est un environnement extrêmement exigeant, dans lequel les capacités d'évolution rapide des avions sont primordiales pour échapper à l'armement adverse et s'imposer sur le théâtre d'opérations. Logiquement, les ingénieurs ont donc essayé de faire intervenir la poussée développée par les moteurs comme paramètre de commande dans le contrôle de la trajectoire. C'est le principe de la poussée vectorielle : en adjoignant des déflecteurs de poussée en sortie de la tuyère d'échappement des réacteurs, on peut diriger le jet d'éjection des gaz dans la direction souhaitée pour accélérer les évolutions de l'aéronef en virage. C'est elle qu'utilisent par exemple les pilotes du *Sukhoï Su-27* soviétique pour adopter



la fameuse position « Cobra » : la propulsion ne se fait plus uniquement en ligne droite, elle devient organe de direction à part entière.

POST-COMBUSTION

Pour produire des accélérations plus brusques ou passer plus rapidement le mur du son, les pilotes de chasse disposent de la **post-combustion**, un



dispositif permettant d'augmenter temporairement la puissance de leurs réacteurs. Le principe de la post-combustion consiste à réinjecter du kérosène dans les gaz chauds en sortie de la tuyère d'échappement, comme dans une seconde chambre de combustion : cela a pour effet d'augmenter fortement la température

des gaz éjectés, et donc de rajouter un excédent important de poussée à la disposition du pilote (parfois plus de 80 % de poussée en plus !). Le désavantage de ce procédé est son coût énergétique : très gourmande en kérosène, la post-combustion ne peut rester allumée plus de quelques minutes.

LA RÉACTION DU FUTUR

Si le turboréacteur, omniprésent en aéronautique, est le moteur à réaction le plus connu du grand public, il existe aussi de nombreux autres modèles de moteurs basés sur le principe d'action-réaction. Le réacteur de demain sera peut-être un des moteurs futuristes que nous présentons ici !

STATORÉACTEUR

Le statoréacteur est un moteur à réaction constitué d'un simple tube, dans lequel on réalise l'injection et la combustion de carburant. Pas de compresseurs, pas de turbines : la géométrie du tube assure à elle seule la compression du flux d'air entrant, puis la détente des gaz chauds éjectés. C'est cette apparente simplicité qui rend justement la mise au point d'un statoréacteur si difficile, puisqu'il faut créer un profil de tuyère à même d'assurer le fonctionnement du réacteur. En règle générale, les concepteurs utilisent une tuyère constituée de trois parties distinctes : une entrée divergente, qui ralentit et comprime le flux d'air entrant, une chambre de combustion dont la forme, la plus difficile à mettre au point, doit assurer la qualité de la combustion et la stabilité de la couronne de flammes utilisées comme allumeurs, puis une tuyère d'éjection dont la forme réalise la détente des gaz chauds pour créer la propulsion. On parle de statoréacteur lorsque la combustion se fait à des vitesses subsoniques, et de superstatoréacteur lorsque le flux d'air rentre en combustion à une vitesse supérieure au Mach : ce dernier est encore plus complexe à mettre au point ! Le gros avantage des statoréacteurs est leur robustesse (pas de pièces mécaniques). Cependant, ils ne peuvent pas fonctionner à l'arrêt, puisque le compresseur est remplacé par la vitesse du flux d'air entrant : il faut donc coupler statoréacteurs et superstatoréacteurs à une autre source de propulsion pour le démarrage. Le

statoréacteur (de Mach 3 à Mach 6) et le superstatoréacteur (au-delà de Mach 6) sont les réacteurs les plus efficaces aux très grandes vitesses : le réacteur de l'avion spatial du futur sera donc très probablement un statoréacteur !

MOTEUR À PROPULSION IONIQUE

Le nom de moteur ionique reste attaché, dans l'esprit du public, à la science-fiction en général et à la série Star Trek en particulier. Cependant, c'est un moteur qui existe bel et bien, dont le principe est connu depuis le début du xx^e siècle et qui fonctionne déjà à l'heure actuelle dans le domaine spatial. Dans un moteur à ions, le carburant n'est pas brûlé, mais ionisé, c'est-à-dire que ses constituants atomiques sont transformés en ions (atomes ou molécules de charge électrique non nulle). Les ions étant des constituants atomiques ou moléculaires porteurs de charge, on peut les accélérer en les soumettant à un champ électrique : c'est ce que fait le moteur à ions, en accélérant le carburant ionisé entre deux grilles fortement chargées. C'est en général un gaz noble, le xénon, qui sert de carburant, car son utilisation évite les problèmes de corrosion au sein du moteur. Le principal avantage du moteur à ion est l'économie de poids qu'ils permettent de réaliser : si leur poussée est bien plus modeste que celle des réacteurs conventionnels, qui restent donc toujours nécessaires pour arracher sondes et satellites à l'attraction terrestre, ils consomment énormément moins de carburant pour atteindre la même vitesse, ce qui représente une économie de poids conséquente et leur permet de fonctionner beaucoup plus longtemps et donc d'atteindre des destinations plus lointaines. Le satellite de télévision européen Astra 2a, soumis aux forces de marée (influence de la Lune et du Soleil), se sert par exemple d'un moteur ionique pour se maintenir en position stable sur son orbite : le carburant d'un moteur fusée conventionnel serait épuisé au bout d'environ 10 ans, alors qu'un moteur à ion lui assure une durée de vie bien plus longue. La sonde européenne SMART-1, lancée par l'ESA le 28 septembre 2003 et actuellement en orbite autour de la Lune, et la sonde américaine Deep Space One, lancée par la NASA le 24 octobre 1998 pour étudier cette technologie en grandeur réelle, utilisent toutes deux un moteur à ions.

Le statoréacteur

