

SUPPLEMENT AU NUMERO 38 DU 16 SEPTEMBRE 1982

# L'USINE

NOUVELLE

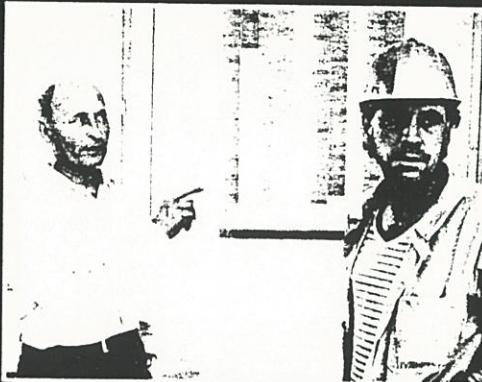
MENSUEL

TECHNIQUE  
INDUSTRIELLE

## LES UTILISATEURS PARLENT **LES CINTREUSES DE TUBES A COMMANDE NUMERIQUE**



**COMMENT  
CHOISIR  
UN LOGICIEL  
D'ELABORATION  
DE  
GAMMES**



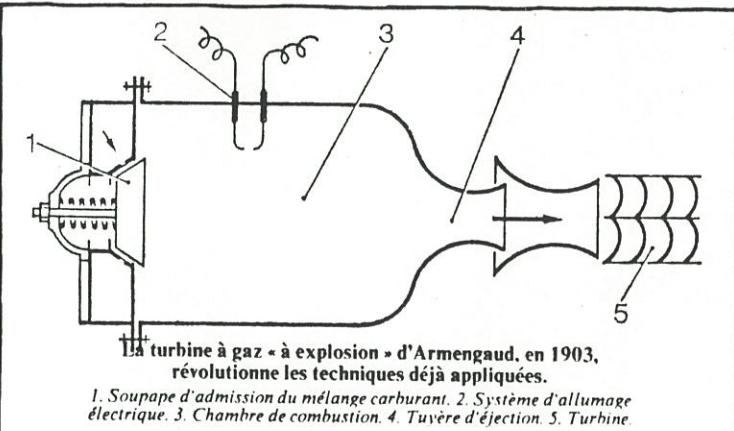
**METIER:  
RECRUTEUR  
DE  
PERSONNEL  
OUVRIER**

Il faut attendre la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle pour que John Barber réussisse à mettre au point la première turbine à gaz.

Ce n'est que dans la dernière décennie du XIX<sup>e</sup> siècle qu'un grand nombre de brevets vont apparaître et donner naissance aux premières réalisations pratiques. Mais c'est surtout dans l'aviation qu'elle prendra son essor notamment avec les turboréacteurs et les turbopropulseurs.



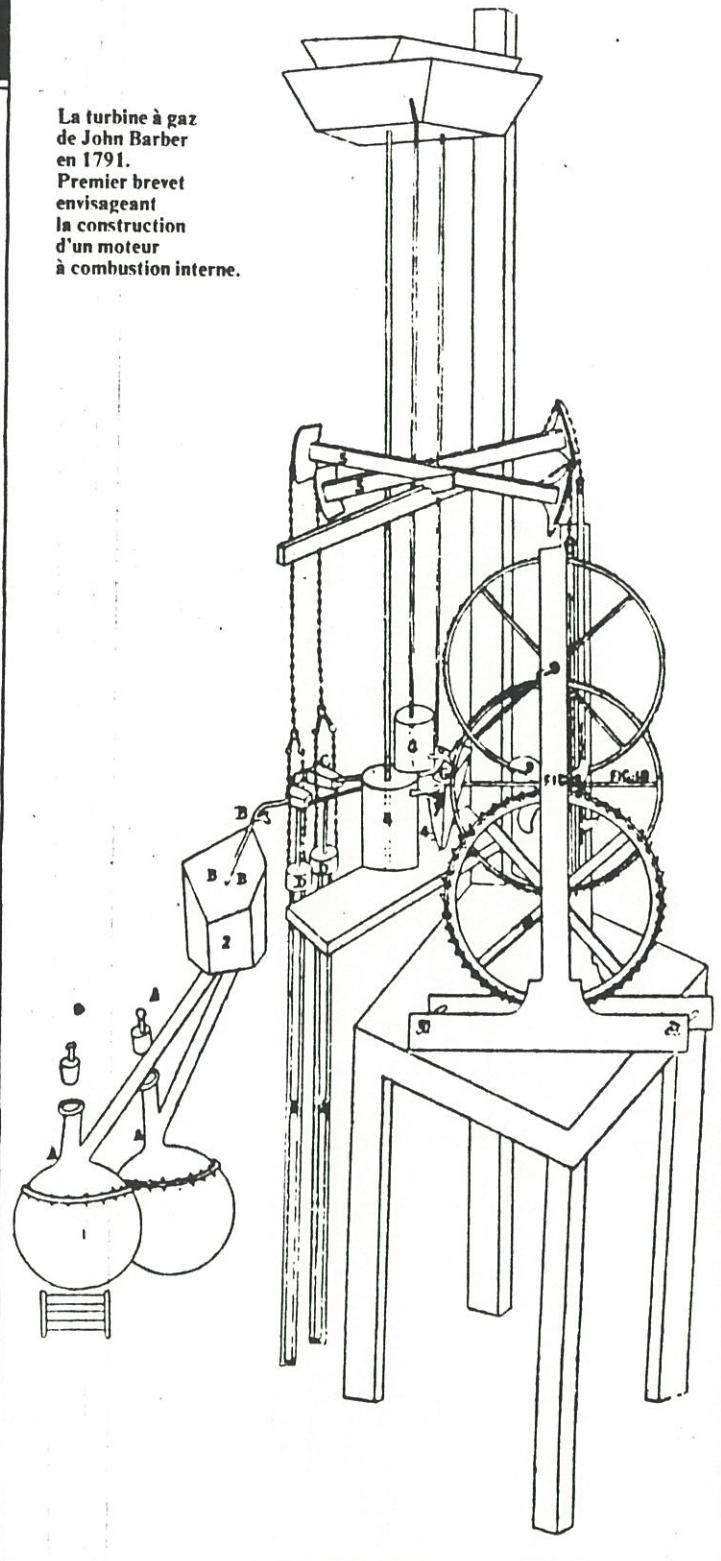
L'ingénieur français Auguste Rateau appliquera la suralimentation aux moteurs d'avion. Ses turbocompresseurs seront réalisés vers 1936.



La turbine à gaz « à explosion » d'Armengaud, en 1903, révolutionne les techniques déjà appliquées.

1. Souape d'admission du mélange carburant. 2. Système d'allumage électrique. 3. Chambre de combustion. 4. Tuyère d'éjection. 5. Turbine.

La turbine à gaz de John Barber en 1791. Premier brevet envisageant la construction d'un moteur à combustion interne.



# LA TURBINE À GAZ

# HISTOIRE DES TECHNIQUES

**L**e premier qui eut l'idée de construire une turbine à gaz fut l'anglais John Barber. Le brevet qu'il prit en 1791 est en même temps la première tentative envisageant la construction d'un moteur à combustion interne après les essais de Huygens et Papin à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Barber prévoit la production du gaz combustible dans un récipient (gazogène) à partir de charbon de bois, houille ou huile, son refroidissement et ensuite, par l'intermédiaire d'une pompe, son introduction, après l'avoir mélangé avec de l'air, dans une chambre de combustion qu'il nomme « expander ». Ici le mélange doit être allumé par une flamme et les gaz brûlés dirigés vers une roue à aubes. Barber préconise aussi l'injection de l'eau dans la chambre de combustion, dans un double but de refroidir les buses d'échappement et d'augmenter par la vapeur produite la quantité de fluide moteur. Mais, après ce premier brevet, qui

d'ailleurs ne devait jamais être matérialisé, l'idée est pratiquement abandonnée pour un siècle. Un manque d'engouement probablement lié au faible développement des turbomachines.

C'est seulement vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, après la mise au point des moteurs à combustion interne à piston et surtout des turbines à vapeur, que les recherches pour la création d'une turbine à gaz prennent de l'importance. Les turbines à gaz devaient être supérieures aux autres types de machines thermiques, puisqu'elles cumulent certains avantages des moteurs à combustion interne à piston et des turbines à vapeur. Mais les difficultés de construction sont très grandes. En effet, deux conditions préalables à un bon rendement sont difficiles à obtenir : la compression, qui se réalise dans des conditions beaucoup moins avantageuses que dans un moteur alternatif à piston ; la température

des produits de combustion des turbines, qui doit être beaucoup plus élevée que celle de la vapeur.

Dans la dernière décennie du XIX<sup>e</sup> siècle, un grand nombre de brevets vont apparaître et donner naissance aux premières réalisations pratiques du début de ce siècle. Ce sont les travaux théoriques de Hugoniot, Rateau, Delaporte, Stodola, Proell, qui ont fortement contribué à ce développement. Les premières réalisations apparaissent en France, grâce au constructeur Armengaud et Lemale, travaillant dans le cadre de la société Turbo-Moteurs ; en Allemagne, grâce au docteur Stolze et à sa société Gasturbinen-Gesellschaft

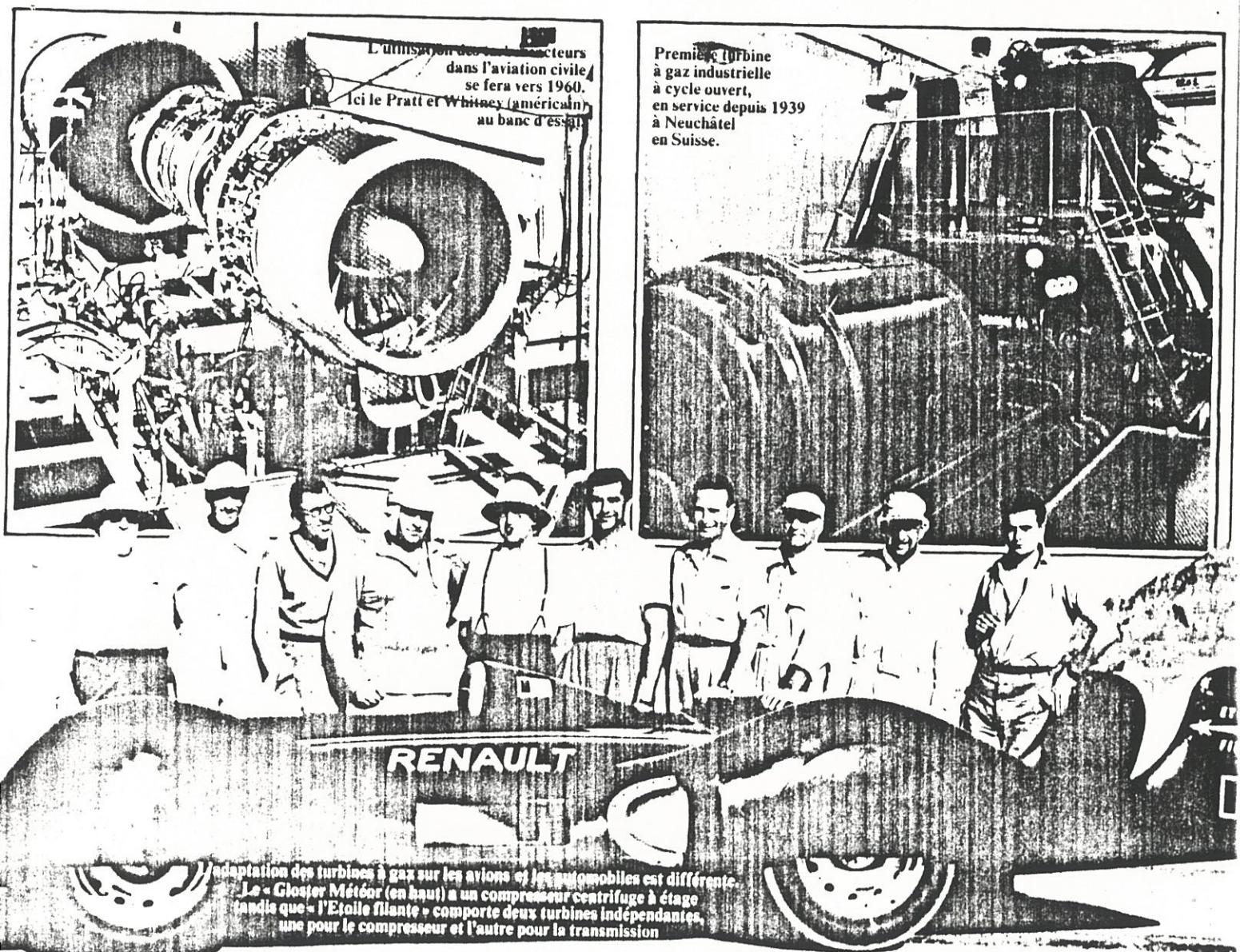
Stolze ; aux Etats-Unis, chez General Electric Co.

Comme dans le cas des moteurs à combustion interne à piston, deux types de turbines à gaz sont conçues : les turbines à gaz à combustion à volume constant, appelées aussi turbines « à explosion », qui sont aujourd'hui abandonnées, et les turbines à gaz à combustion à pression constante, appelées à l'époque turbines « à combustion » ou aujourd'hui turbines à gaz tout simplement.

Dans les turbines à gaz « à explosion » comme dans les moteurs à piston « à explosion », la combustion se déroule à volume constant. La chambre de combustion est isolée par des soupapes pendant la

L'ultime jour des moteurs dans l'aviation civile se fera vers 1960. Ici le Pratt & Whitney (américain) au banc d'essai.

Première turbine à gaz industrielle à cycle ouvert, en service depuis 1939 à Neuchâtel en Suisse.



# LA TURBINE A GAZ

combustion. Les premières turbines à explosion ont été conçues comme turbines fonctionnant sans compression préalable du mélange carburant.

Parmi les premiers brevets, on doit citer ceux de Peer, de Brooklyn (1890) et de Nordenfeldt et Christophe (Paris, 1894), tous les deux caractérisés par le fait que le mélange combustible est aspiré dans une chambre sans soupape en aval. Il n'existe qu'une soupape à l'aspiration. Après 1900, le nombre des brevets envisageant la construction de telles turbines se multiplie. On peut citer ceux de Colemann (1900), Huet (1901), Sidon (1902), Courtin, Massion (1902), etc.

C'est finalement l'ingénieur français Armengaud qui, en 1903, au congrès de la mécanique de Liège, présente la première turbine à gaz à explosion. La chambre de combustion ne comporte qu'une seule soupape, celle d'admission, rappelée sur son siège par un ressort dont la tension peut être réglée à volonté. Le siège de la soupape est percé d'un certain nombre d'ajutages qui débouchent dans une couronne annulaire qui forme un collecteur du gaz combustible. L'admission se fait à la pression atmosphérique, donc sans compression préalable du mélange. L'inflammation s'effectue à l'aide d'un système d'allumage électrique de haute tension par bougie. La turbine proprement dite est du type « à action » à un seul étage. La fréquence des explosions est de 80 par seconde ; le rendement de 4 %.

## La première turbine à gaz employée industriellement

La turbine à gaz à explosion a un avantage majeur qui consiste dans son fonctionnement avec pulsations dues à l'entrée des gaz à pression et température variables. Pour éliminer cet inconvénient, plusieurs solutions ont été envisagées, dont : l'alimentation à l'aide d'une chambre de combustion à plusieurs soupapes d'évacuation qui s'ouvrent à des pressions différentes et, surtout, l'alimentation à l'aide de plusieurs chambres de combustion avec un fonctionnement décalé dans le temps.

L'Allemand Holzwarth, le constructeur le plus connu de l'époque, sera parmi les premiers à réaliser de telles turbines. La compression préalable est réalisée à l'aide des compresseurs déjà assez bien mis au point à l'époque pour l'injection pneumatique dans les moteurs

Diesel. Le premier modèle Holzwarth de ce type, qui date de 1909, comporte un compresseur centrifuge qui réalise une précompression d'environ 1,5 atmosphère. L'allumage est électrique à haute tension par bougies. Une seconde turbine du même type sera installée par Holzwarth en 1910 à Mannheim : ce sera la première turbine à gaz employée industriellement. Elle comporte dix chambres de combustion avec un fonctionnement décalé dans le temps. Le combustible utilisé est un gaz fourni par un gazogène à l'antracite. Les compresseurs centrifuges à gaz et à air sont actionnés séparément électriquement et réalisent une précompression d'environ 1,5 atmosphère. La turbine proprement dite est à action à deux étages de vitesse.

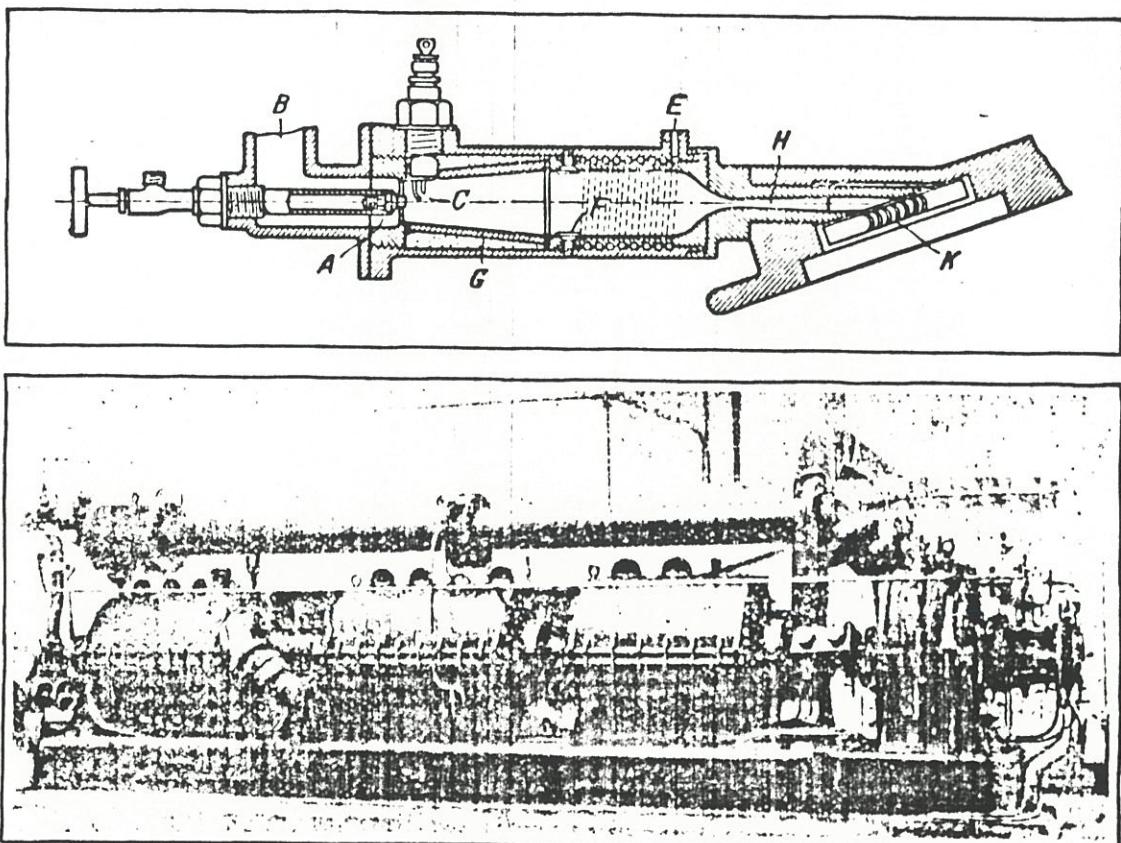
D'autres turbines de ce type seront conçues par Holzwarth et construites par Thyssen et Cie à Mühlheim (Ruhr) entre 1914 et 1934. L'augmentation du taux de

compression jusqu'à 3,5 atmosphères permettra d'atteindre un rendement de 13 %. Les compresseurs centrifuges sont alors entraînés à l'aide d'une turbine à vapeur dont la vapeur est obtenue à partir de l'eau utilisée pour le refroidissement des chambres de combustion. Les aubes des turbines sont estampées, construites en acier très doux. Le combustible employé est gazeux ou liquide. Ces turbines sont employées dans des centrales électriques. Par exemple, la centrale électrique de Muldenstein utilisait une turbine de 500 ch à 3 000 tr/mn.

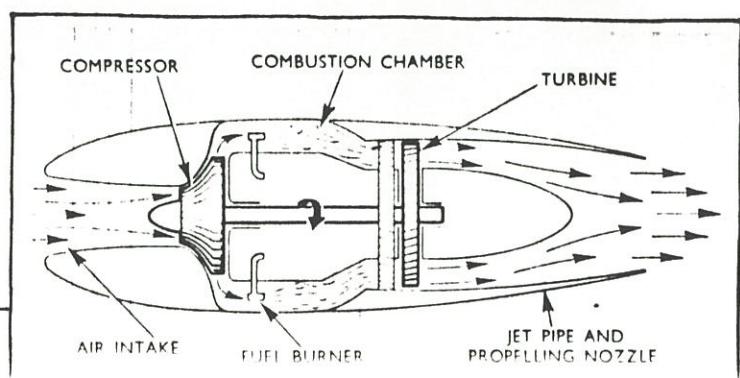
On tentera encore d'améliorer le rendement par plusieurs échauffements et refroidissements intermédiaires et par la récupération d'énergie thermique des gaz évacués. Mais les désavantages de ces turbines demeurent importants. La pression et la température variables des gaz à l'entrée dans la turbine provoquent un fonctionnement pulsatoire avec des vibrations dangereuses sur les aubages.

D'autre part, le mécanisme de commande des soupapes d'admission et d'évacuation est compliqué. La construction de turbines à explosion est complètement abandonnée après la Seconde Guerre mondiale.

Dans les turbines à combustion, le processus de combustion se déroule à pression constante dans une chambre ouverte aux deux extrémités. La chambre est alimentée d'une manière continue par des compresseurs. Les premières propositions pour la construction d'une turbine à combustion remontent à 1847, quand l'ingénieur français des mines Burdin propose la construction d'une « turbine à air chaud à roues multiples utilisant comme compresseur une série de ventilateurs couplés en tension ». Quelques années plus tard, en 1853, un autre Français, Tournaire, envisage une construction similaire et expose à l'Académie des sciences, à Paris, les difficultés



**Les premières réalisations pratiques apparaîtront en France grâce aux frères Armengaud et à Charles Lemale.**  
En haut : schéma de la turbine à gaz Armengaud Lemale de la société des Turbo-Moteurs.  
Ci-dessus : réalisation pratique en 1905.  
Ci-contre : premier schéma du turbocompresseur de Frank Whittle.



# LA TURBINE A GAZ

pratiques de la réalisation des turbines à gaz et la « révolution complète qui serait accomplie en cas de succès ». Mais il semble que le premier brevet décrivant un dispositif bien défini soit celui de Laval, pris à Stockholm en 1893. Le célèbre inventeur de la turbine à vapeur à action proposait d'envoyer de l'air comprimé dans une chambre de combustion qui recevait aussi le combustible liquide pulvérisé. La chambre de combustion était immédiatement suivie d'une tuyère de détente qui conduisait les gaz brûlés sur une turbine à action. Le brevet de Laval était muet en ce qui concerne le compresseur et l'injection du combustible. La chambre de combustion et la tuyère devaient être en terre réfractaire ou en porcelaine, sans refroidissement.

C'est l'Allemand Stolze, de Charlottenburg, qui, en 1899, préconise dans son brevet un compresseur centrifuge accouplé directe-

ment sur l'arbre même de la turbine proprement dite. Ce type de construction va être celui qui va déterminer l'essor des turbines à gaz après la Seconde Guerre mondiale. Sur ce brevet, la société Gas-turbinen-Gesellschaft Stolze aurait construit vers 1904 une turbine d'essai de 200 ch, en tout cas non suivie d'autres réalisations.

Les premières tentatives industrielles ont été effectuées en France dans le cadre de la société Turbo-Moteurs par les frères Armengaud et Charles Lemale. Dès 1901, Charles Lemale avait pris un brevet de turbine à combustion, mais c'est seulement en 1905 qu'Armengaud et Lemale réussissent à construire quelques prototypes qui fonctionnent avec un rendement presque nul. Elles étaient composées d'un compresseur centrifuge de deux à quatre étages, d'une chambre de combustion en deux parties (une réfractaire, l'autre en acier refroidie par l'eau) et de la turbine proprement dite, à

action simple ou à action à étages de vitesse, qui entraînait directement le compresseur couplé sur le même axe. Le combustible employé était un liquide. Un flammeur électrique formé d'un fil de platine porté à incandescence placé à l'extrémité de l'injecteur allume le pétrole à son arrivée dans la chambre. Dans la partie inférieure de celle-ci, l'eau de refroidissement pénètre à l'état de vapeur et vient se mélanger aux gaz brûlés pour agir sur la turbine.

Après plusieurs turbines d'essai de petite puissance (environ 25 ch) Armengaud et Lemale mettent au point en 1906 un modèle de 300 ch à 4 000 tr/mn. La compression réalisée avec un compresseur centrifuge à trois étages entraîné par la turbine même était de 5 atmosphères. Deux pompes calées sur l'arbre débitaient l'eau et le pétrole. L'injection du combustible se faisait avec une pression de 7 atmosphères. La turbine proprement dite, qui était à action à étages de vitesse, recevait les gaz brûlés par trente-trois tuyères de 10 mm. Mais le rendement demeurait toujours presque nul, la puissance fournie par la turbine étant à peine supérieure à celle absorbée par le compresseur.

En fait, bien que le principe ait été défini, l'état de la métallurgie et de la mécanique des fluides ne permettra pas de réaliser une turbine à combustion vraiment exploitables avant la Seconde Guerre mondiale.

## La suralimentation appliquée aux moteurs d'avion

Cependant, avant cette date, on savait déjà utiliser des turbines auxiliaires alimentées par les gaz d'échappement. Ces turbines entraînent généralement des compresseurs de suralimentation pour les machines dont elles utilisent le gaz d'échappement. C'est le Suisse Alfred Buchi qui imagine ainsi en 1905 la suralimentation des moteurs Diesel. Les premières réalisations sont dues à la maison Brown-Boveri. En 1917, l'ingénieur français Auguste Rateau applique la suralimentation aux moteurs d'avion. Celle-ci se généralisera vers 1936. Avec pour conséquence la création des moteurs d'avion « compound ». Dans ces moteurs, la détente des gaz d'échappement se fait en plusieurs turbines, dont une seulement sert à entraîner le compresseur de suralimentation, les autres étant couplées sur l'arbre moteur, auquel elles transmettent leur puissance.

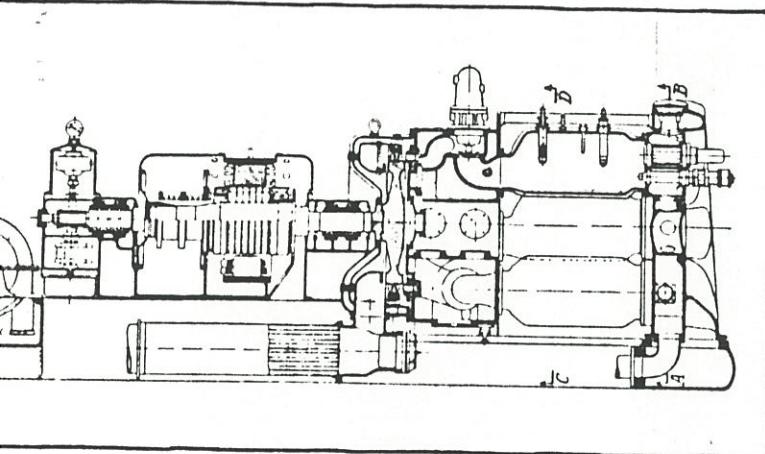
La suralimentation est utilisée aussi pour les chaudières à vapeur et tous les cas où de l'air comprimé est nécessaire pour le déroulement plus favorable des réactions chimiques. Sur les chaudières, en effet, les coefficients de transmission de chaleur augmentent avec la pression et la vitesse des gaz. Construite par Brown-Boveri en 1928 la « Velox » sera la première chaudière suralimentée. Dans l'industrie du raffinage du pétrole, notamment dans la procédure de cracking Houdry, une turbine à gaz mue par les gaz chauds entraîne un compresseur d'alimentation qui assure l'air comprimé nécessaire à l'opération. La création et la mise au point des turbines à gaz d'échappement ont permis le perfectionnement des turbines à gaz proprement dites : grâce à ces progrès, les premières turbines à gaz avec chambre de combustion propre seront construites pendant la Seconde Guerre mondiale.

Bien que l'idée d'utiliser un groupe turbine à gaz-compresseur existât depuis le début de l'aviation, c'est seulement à partir de 1928 que les premiers essais sérieux furent entrepris. Ils ont été effectués en Grande-Bretagne par Frank Whittle. Les recherches aboutirent le 15 mai 1941 avec le vol d'un avion à réaction mû par le turboréacteur Whittle-W1 conçu par lui. Le W2 employait un compresseur centrifuge et développait une poussée de 375 kg.

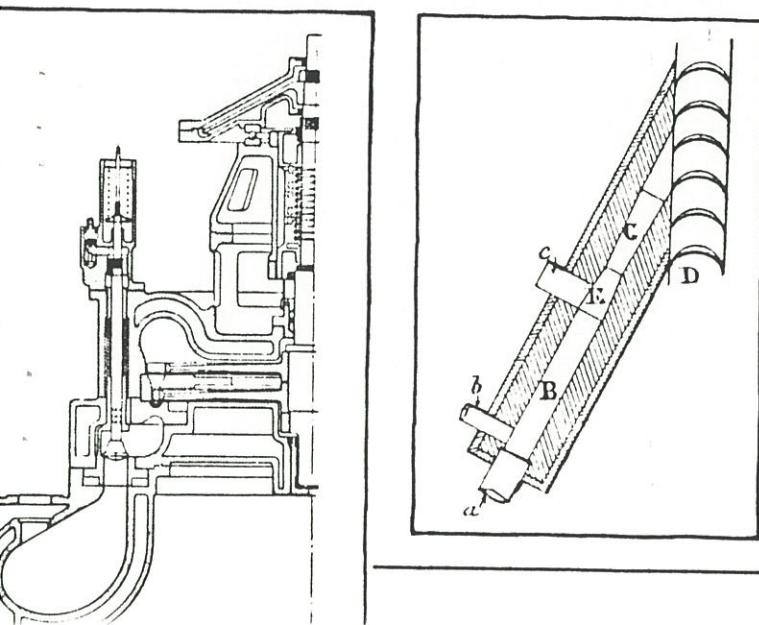
Parallèlement aux travaux de Whittle et sans en être au courant, le turboréacteur fut secrètement étudié aussi en Allemagne à partir de 1936. Avec Max Hahn, Hans von Ohain avait breveté une telle machine en 1934, à l'époque où il était encore étudiant à l'université de Göttingen. Le 27 août 1939, grâce aux deux Allemands, devait voler le premier avion à turboréacteur. Il était conçu par Hans von Ohain. Comme celui de Whittle, il comportait un compresseur centrifuge.

Après ces premières réalisations pratiques, le développement des turboréacteurs d'aviation se poursuit en Angleterre et en Allemagne. Les premiers turboréacteurs construits en série ont été réalisés en 1944 en Angleterre par Rolls Royce (les moteurs Walland, Derwent I et Derwent V) et en Allemagne par Junkers (le moteur Jumo 004) et BMW (le moteur BMW 003).

Les moteurs Rolls Royce s'apparentent au type de base Whittle avec un compresseur centrifuge à



En bas, à gauche : schéma de type primitif en 1908 de la turbine Holzwarth.  
En 1914, il créera la turbine à pétrole de 500 ch. (3 000 t/min)  
avec son groupe compresseur indépendant (ci-dessus).  
En bas, à droite : turbine à gaz brevetée par Laval à Stockholm en 1893



# LA TURBINE A GAZ

un étage à simple entrée (Derwent I) ou à double entrée (Derwent V) entraîné par une turbine à un étage. Ils ont été utilisés sur l'avion Gloster Meteor, qui prenait en chasse les bombes volantes V1.

Les moteurs allemands Junkers (Jumo 004) et BMW (BMW 003) sont d'un type différent, étant équipés avec compresseur axial. Le turboréacteur Jumo 004 comprend un compresseur axial à neuf étages entraîné par une turbine à un étage et six chambres de combustion à flux direct réparties autour de l'axe entre le compresseur et la turbine. Il développait une poussée de 900 kg et a été utilisé pendant la guerre comme propulseur des avions Messerschmitt 262.

## Les progrès de la mécanique et des matériaux

Après la guerre, la construction des turboréacteurs pour l'aviation va se développer d'abord pour les avions militaires et ensuite, vers 1960, pour l'aviation civile. Un grand nombre de constructeurs apparaissent aux côtés des anciens. En Angleterre : Rolls Royce, Metropolitan-Vickers de Havilland, Napier, Armstrong-Siddeley, Bristol. Aux Etats-Unis : Wright, Boeing, Continental, Allison, Westinghouse, General Electric, Pratt & Whitney. En France : SNECMA, Compagnie électromécanique, Rateau, Turboméca et Hispano-Suiza.

Le développement et le perfectionnement des turboréacteurs se poursuivent avec la préoccupation principale d'augmenter le rendement, la puissance totale et spécifique, etc. Cela a été conditionné surtout par les progrès réalisés dans la construction des turbines à gaz (compresseur, chambres de combustion, turbine proprement dite). Il faut souligner que les perfectionnements des turbines à gaz ont été demandés par le turboréacteur, les turbines à gaz employées dans d'autres domaines n'étant souvent que des adaptations des turbines à gaz des turboréacteurs à ces domaines.

La turbine à gaz évolue, comme tout moteur à combustion interne, dans le sens de l'augmentation du rendement, de la puissance et de la réduction du poids et de l'encombrement.

Ces désiderata sont réalisés par l'augmentation du taux de compression et de la température de fonctionnement, qui s'accompagne nécessairement de l'optimisation de l'aérodynamique interne de

la machine ainsi que de la mise au point de matériaux de plus en plus performants. Dans les mêmes buts sont utilisés aussi le cycle de fonctionnement avec récupération et celui avec refroidissement et réchauffement intermédiaire. Ainsi, le rendement, dans un cycle simple, atteint, vers 1965, 18 % ; dans un cycle avec récupération 28 % et dans celui avec refroidissement, réchauffement intermédiaire et récupération, 40 %.

Il est vrai que les éléments d'une turbine à gaz ont beaucoup évolué : les compresseurs centrifuges à un ou plusieurs étages ont été presque toujours remplacés après 1950, d'abord sur les turboréacteurs puis sur les turbines stables de grande puissance par des compresseurs axiaux. Le compresseur axial autorise des taux de compression beaucoup plus élevés que le compresseur centrifuge, avec un rendement supérieur d'environ 10 % (90 % au lieu de 80 %). Les compresseurs centrifuges

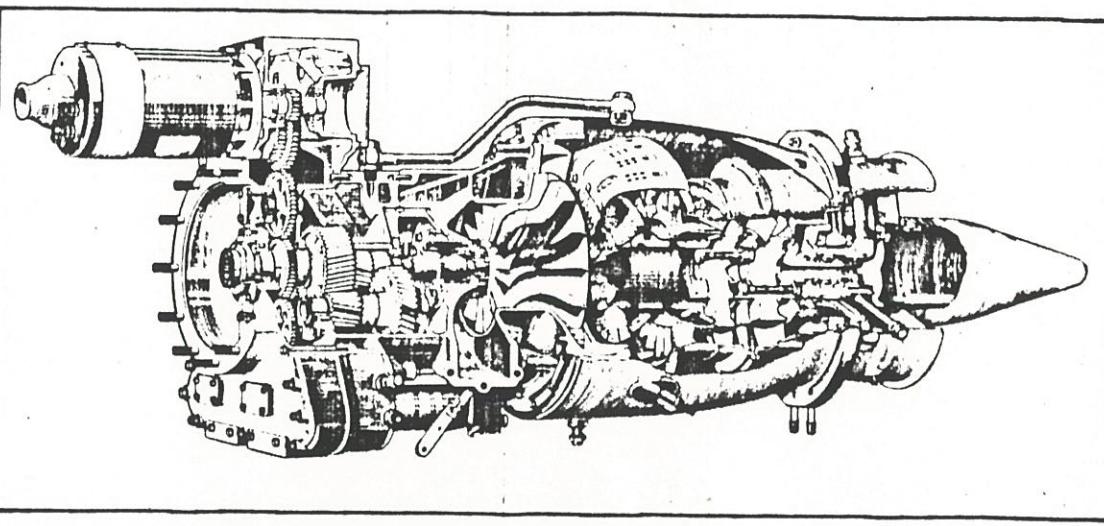
n'ont cependant pas été complètement abandonnés à cause de certains avantages : construction plus simple et économique, rendement plus stable dans les régimes de fonctionnement variable. La forme des aubes du compresseur est profilée pour conférer plus d'énergie à l'air, ce qui se traduit aujourd'hui par des écoulements entre les aubes à des vitesses parfois supersoniques.

Les chambres de combustion jouent un rôle très important dans une installation de turbine à gaz dont l'économie et la sécurité de fonctionnement dépendent dans une large mesure de la construction de celle-ci. C'est pour cela que des perfectionnements et améliorations sont apportés tout le temps. Les chambres de combustion sont construites de telle manière qu'une partie de l'air refoulé par le compresseur (air primaire) sert à la combustion, le reste (air secondaire) étant utilisé à refroidir la chambre et à diminuer la tempéra-

ture des gaz de combustion qui accèdent à la turbine proprement dite. Le combustible est injecté dans les chambres de combustion par différents types d'injecteurs ou brûleurs en fonction de la nature du combustible. Celui-ci est généralement liquide (kérosène, gasoil, fuel), les combustibles gazeux ou solides étant employés beaucoup plus rarement. Une préparation spéciale du liquide évite la déposition des cendres sur les aubes.

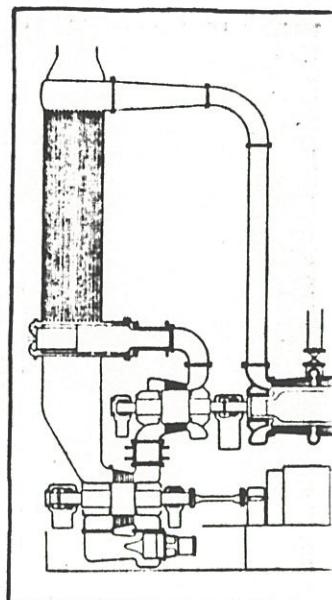
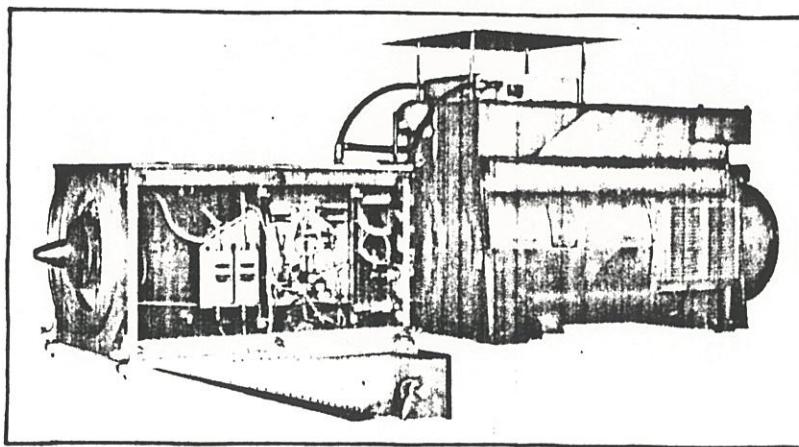
## Un métal résistant aux températures élevées

Les turbines à réaction se sont imposées à cause de leurs rendements supérieurs. Ils dépassent aujourd'hui 90 %. Les progrès réalisés dans le refroidissement et dans les matériaux des aubes autorisent le passage de gaz de plus en plus chauds. Vers 1965, on arrive à 800 °C dans les installations fixes et 1 200 °C pour les turbines



L'« Artouste II » de Turbomeca (ci-dessus) équipe l'hélicoptère « Alouette » et le « Astazou IV » (ci-dessous) assure la propulsion électrique des chasseurs de mines dans les Marines françaises, belges et néerlandaises.

Ci-contre : la première turbine British Thomson-Houston, équipant le pétrolier de la marine marchande anglaise « Auris » en 1951.



# LA TURBINE A GAZ

d'avion, contre respectivement 600 °C et 700 °C avant la guerre. Les températures de fonctionnement peuvent atteindre de nos jours 1 400°C et des travaux sont en cours chez General Electric pour utiliser des températures de 1 650°C.

A ces températures, les matériaux employés dans la construction des aubes doivent présenter une haute résistance à l'oxydation et aux actions chimiques (exercées par les produits contenus dans les gaz de combustion), une résistance mécanique élevée et, surtout, un bon comportement au fluage.

Dans les années 60, parmi les différents matériaux employés pour la construction d'organes de turbines à gaz, on peut citer les aciers ferritiques et austénitiques. Les principaux éléments d'alliages employés sont le molybdène, le tungstène, le nickel, le chrome, le cobalt, etc., dont certains contiennent des proportions très importantes. Par exemple, le Nimonic 80,

un des plus connus des alliages austénitiques, contient 75 % de nickel, 20 % de chrome et seulement 5 % de fer. D'autres matériaux ont été essayés. L'une des solutions envisagées consiste à employer un métal résistant aux températures élevées (exemple : molybdène) et à le protéger contre toute action chimique à l'aide d'un revêtement en matière céramique. Une autre solution essayée est de réaliser des aubes exécutées entièrement en matière céramique (exemple : carbure de silicium).

Un des aspects essentiels des améliorations s'oriente vers un refroidissement plus efficace des aubes. Ainsi le refroidissement à l'aide de l'air comprimé et relativement froid prélevé au refoulement du compresseur et qui est utilisé aussi pour le refroidissement de la chambre de combustion est amélioré. Parfois les aubes sont confectionnées dans un matériel poreux ou dernièrement on envisage la construction à structure lamellaire

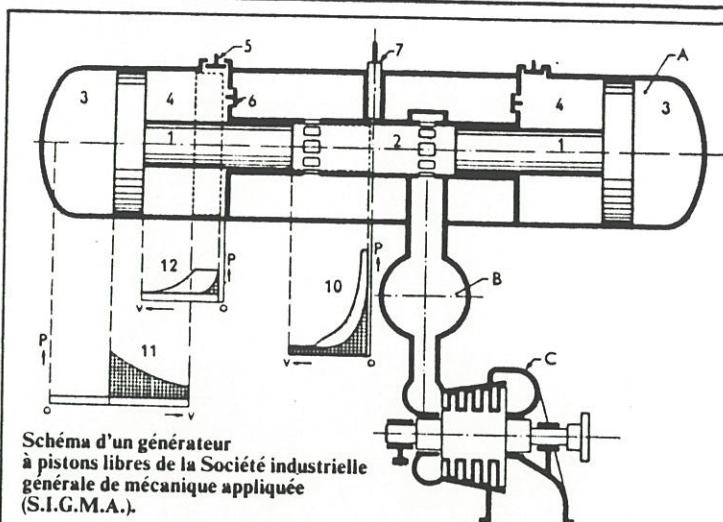


Schéma d'un générateur à pistons libres de la Société industrielle générale de mécanique appliquée (S.I.G.M.A.).

## LES CHANCES DU GENERATEUR A PISTONS LIBRES

Une intéressante solution employée dans la construction des turbines à gaz a été le remplacement des chambres de combustion et du compresseur par un générateur de gaz à pistons libres. Dans ce système, la combustion se déroule à pression variable. Les pressions et températures élevées permettent d'obtenir un rendement supérieur. Rappelons qu'un générateur à pistons libres n'est qu'un moteur Diesel à deux temps et à pistons opposés ne comportant pas de pièces tournantes; toute la puissance étant absorbée par le compresseur de suralimentation. Les deux pistons opposés du moteur Diesel sont reliés chacun rigidement à un piston du compresseur; pour assurer aux deux équipages des pistons des mouvements rigoureusement symétriques, ils sont reliés par un emboîtement de synchronisation.

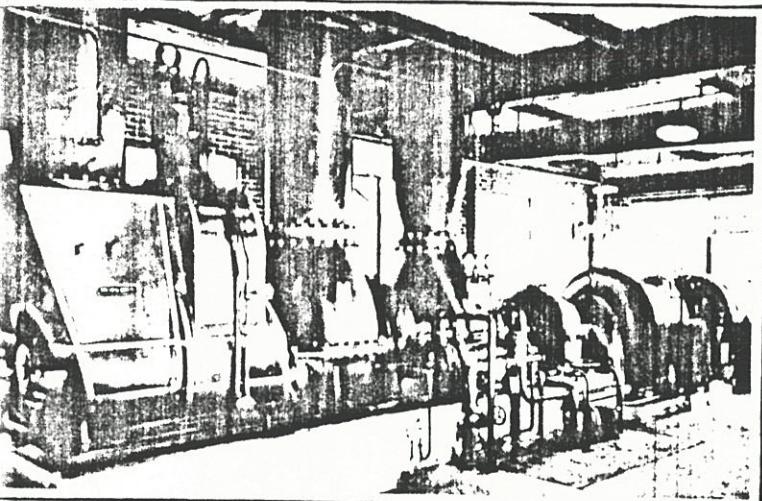
Le premier générateur à pistons libres a été réalisé en 1937. Il avait pour modèle le compresseur à pistons libres déjà conçu en Allemagne, avant la Première Guerre mondiale, par Hugo Junkers. Mais c'est seulement après la Première Guerre mondiale que Hugo Junkers et Paul de Patras Pescara réalisent des compresseurs à pistons libres utilisables. Ce dernier construit dès 1920 en France un tel compresseur employé pour la propulsion par réaction d'un hélicoptère. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les Allemands les utilisaient avec succès sur les sous-marins.

Bien que les premiers essais de générateurs à pistons libres utilisés comme générateur des gaz pour remplacer la chambre de combustion et le compresseur d'une turbine à gaz datent de 1937, c'est seu-

lement après la Seconde Guerre que cette adaptation sera mise au point. C'est la maison française Sigma (Société industrielle générale de mécanique appliquée) qui y parvient la première. Certains de leurs avantages par rapport aux turbines à gaz classiques (rendement supérieur, robustesse accrue, dimensions et poids réduits) font qu'on essaie de les utiliser surtout quand il s'agit des installations déplaçables : traction ferroviaire, navale ; centrales électriques mobiles, etc. Une première locomotive mue par une turbine à gaz alimentée par un générateur à pistons libres a été réalisée en 1952 par Renault. La turbine développait 736 kW.

Dans la traction navale, des essais ont été réalisés après 1950 en France et en Amérique. En 1953, les bateaux français « Cantenac » et « Mérignac » ont été équipés avec de telles turbines. En 1957, le bateau américain « William Patterson » fut le premier transatlantique équipé avec une turbine à gaz alimentée par un générateur à pistons libres (deux turbines mues par six générateurs).

De tels dispositifs ont été utilisés comme source d'énergie aussi dans des centrales électriques fixes. Parmi les premières réalisations, on peut citer : la centrale de Reims de 1500 kW équipée avec une turbine Alsthom alimentée par deux générateurs ; la centrale d'Ajaccio (1955) ; la centrale de Cherbourg (1955) de 6000 kW avec une turbine Alsthom alimentée par huit générateurs. Actuellement la maison Garrett développe une famille de turbines « GT 601 » de 336 à 445 kW alimentées par un générateur à gaz et destinées aux camions.



Première installation de suralimentation de Brown-Boveri dans une usine de raffinage d'huile.

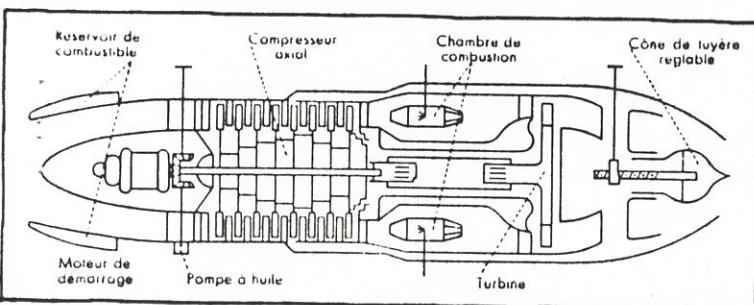
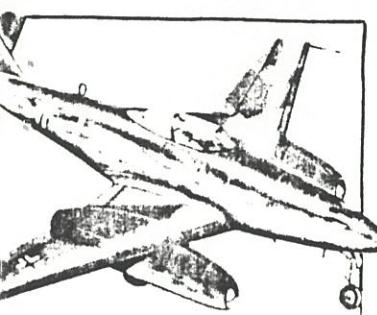


Schéma du turboréacteur « Jumo 004 ». Ces premiers réacteurs allemands furent construits en série en 1944 et développaient une poussée de 900 kg.



Le Messerschmitt 262. Construits par Junkers, ces avions furent créés pendant la dernière guerre et étaient propulsés par les turboréacteurs « Jumo 004 ».

# LA TURBINE A GAZ

qui offre la possibilité d'une circulation complexe d'air de refroidissement. On y ajoute aussi d'autres solutions. Ainsi des aubes à circuit de refroidissement intérieur furent conçues. Le refroidissement du liquide est plus efficace, mais il complique la construction de la turbine.

En théorie, c'est l'évolution de l'agent moteur suivant un cycle avec compression et détente isothermiques qui réalise le rendement maximum. En vue d'utiliser au moins partiellement les avantages d'une telle évolution, on réalise des installations qui fractionnent la compression et la détente à l'aide de plusieurs turbines et compresseurs entre lesquels on réalise un réchauffement du fluide moteur ou respectivement un refroidissement de l'air comprimé.

L'évolution suivant un cycle réel est d'autant plus proche d'une évolution suivant un cycle idéal isothermique que le nombre de refroidissements et de réchauffements est grand. Mais chaque refroidissement et réchauffement impose des complications de construction et des pertes de pression ; on limite leur nombre généralement à deux ou trois : elles sont utilisées seulement pour les installations fixes de grande puissance.

## Des succès inégaux sauf dans le ciel

Ces dernières années les chocs pétroliers ont donné une nouvelle impulsion à la recherche des turbines à gaz plus performantes surtout en ce qui concerne le rendement. La mise au point des nouvelles méthodes de calcul bi et tridimensionnelles et l'utilisation de l'ordinateur dans l'établissement des profils des aubes et de toute l'aérodynamique interne de la machine constituent, à côté des améliorations déjà évoquées, les voies suivies. Spécifions pourtant que la simulation, par le calcul, de tous les phénomènes dans l'écoulement et l'évolution de l'agent moteur dans une turbine à gaz n'est pas encore possible compte tenu des difficultés théoriques rencontrées au cours de la modélisation.

Les succès remportés par la turbine dans le turboréacteur allaien-t-ils démoder les turbines à vapeur ou le moteur à combustion interne ? La puissance massique plus élevée, les frais d'entretien réduits, la consommation de combustible meilleur marché plaident bien en faveur de cette solution. Pourtant, le rendement inférieur, l'utilisation de matériaux chers dans la construction, les faibles caractéristiques

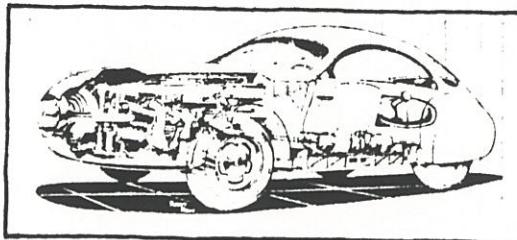
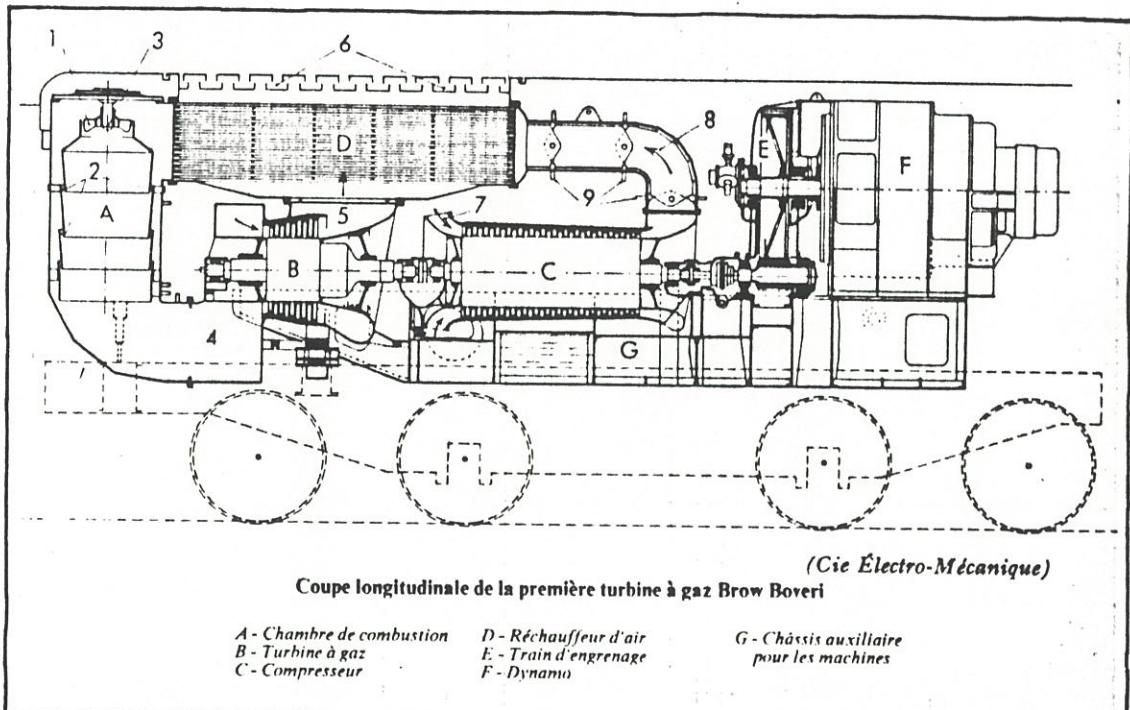
d'accélération, l'impossibilité de travailler avec de hautes pressions comme celles de la turbine à vapeur font qu'aujourd'hui la turbine à gaz, en dehors de l'aviation, n'a pas supplanté ses concurrents.

Dans l'aviation, à côté du turboréacteur, apparaîtra rapidement le turbopropulseur : c'est une turbine à gaz classique, qui entraîne l'hélice par un engrenage réducteur. L'énergie cinétique restant dans les gaz d'échappement est utilisée sous forme d'un jet de gaz dont la réaction assure une poussée additionnelle. Souvent la turbine à gaz des turbopropulseurs est prévue avec un récupérateur. D'abord destinés aux applications militaires, puis, vers 1950, à l'aviation civile, les turbopropulseurs se sont développés jusqu'en 1965. Ensuite, avec l'accroissement de la vitesse des avions, ils ont commencé à être de plus en plus remplacés par les turboréacteurs. Le turbopropulseur jouit encore d'un grand succès en tant que moteur d'hélicoptère,

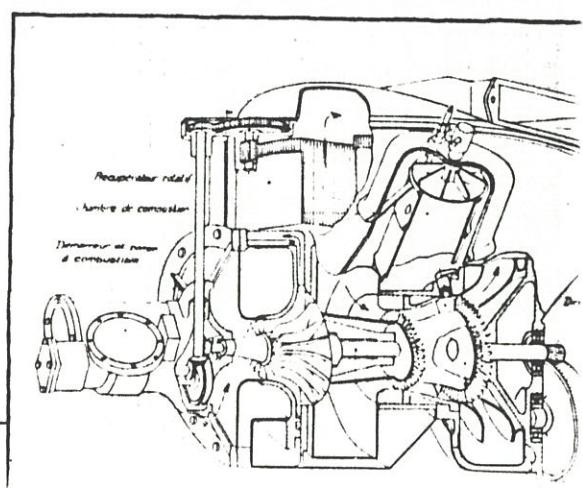
où son faible poids est une qualité très recherchée et où une consommation élevée n'est pas extrêmement importante. Parmi les turbo-propulseurs construits les plus connus, on peut citer ceux d'Armstrong-Siddeley : Python, d'une puissance équivalente de 4900 ch, dérivé des turboréacteurs ASX à une seule turbine à deux étages compresseur axial à quatorze étages, et les Mamba, variantes civiles, moins puissantes que Python. Ceux de Rolls Royce : Clyde (puissance équivalente : 4050 ch), avec deux turbines pour l'entraînement séparé de l'hélice et deux compresseurs, un axial suivi d'un centrifuge ; Dart (puissance équivalente : 2100 ch), avec une seule turbine et un compresseur centrifuge à deux étages. C'est l'un des premiers turbopropulseurs, employé en 1953 pour l'aviation civile. Ceux de Bristol : Thésée, avec deux turbines, deux compresseurs (un axial à neuf étages et un centrifuge) et un récupérateur. Ceux de

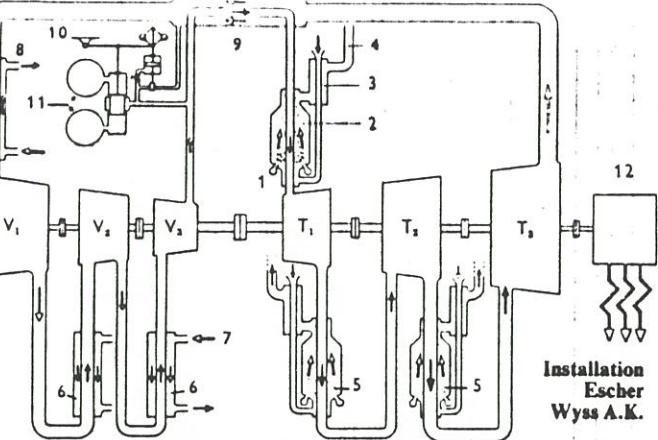
Allison : T-38, avec une turbine et un compresseur axial à dix-sept étages. Ceux de General Electric : T-31 de 2090 ch, avec une turbine, compresseur axial à quatorze étages. Ceux de Pratt & Whitney : T-34 - P7W de 6100 ch, avec une turbine et un compresseur axial à treize étages. Ceux de Boeing. Ceux de Turboméca : Boston (1000 ch) ; Astazou II (560 ch) ; Orédon ; Artouste II (sur l'hélicoptère Alouette). Ceux de l'URSS : Ivchenko AI-20 et Kuznetsov NK-12M, le plus puissant construit vers 1965, de 1300 ch, avec un compresseur axial à quatorze étages et une turbine à cinq étages.

La première locomotive mise au point par Brown-Boveri et Cie pour les chemins de fer suisses en 1941, avait une turbine à gaz développant 1600 kW et était prévue avec un compresseur axial, un récupérateur, une seule chambre de combustion et une turbine à réaction. La locomotive utilisait une transmission électrique. En



Ci-dessous : coupé de la voiture à turbine à gaz Socema-Grégoire.  
 Le moteur Chrysler (à droite) fut le premier à envahir le marché de la voiture à turbine à gaz.

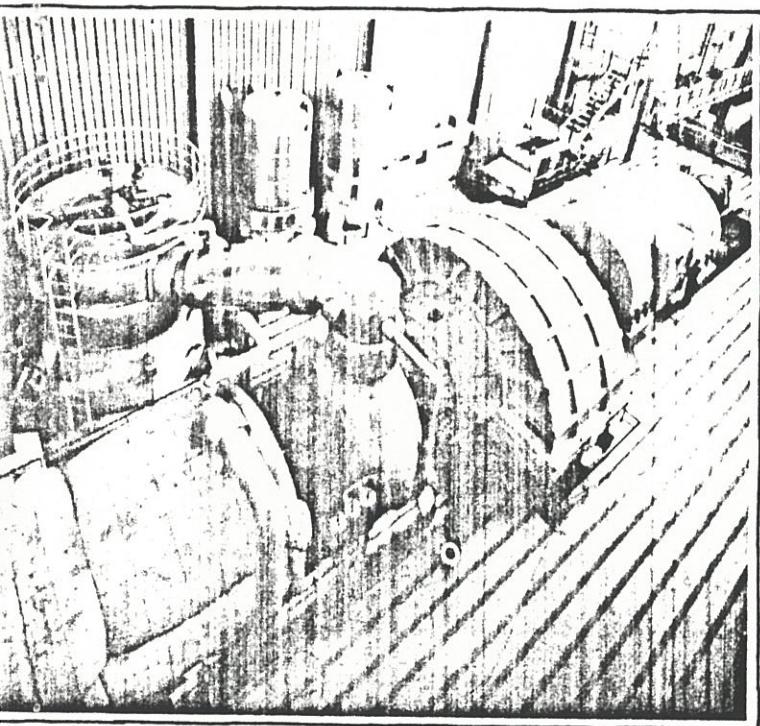




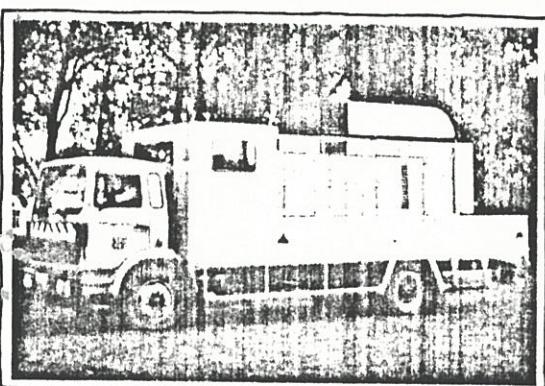
### TURBINES A CIRCUIT FERME : UNE VOIE OUBLIEE

Les turbines à gaz à circuit fermé utilisent une même masse gazeuse soustraite à toute communication avec l'atmosphère. Le circuit fermé permet d'élever les niveaux des pressions extrêmes du cycle, donc de la densité moyenne du fluide moteur, ce qui augmente la puissance spécifique de l'installation et son rendement. Ce type d'installation fut envisagé déjà en 1900 par Knoring et Nadrowsky en Allemagne, mais elle ne sera mise au point qu'après la Seconde Guerre mondiale.

mondiale chez Escher-Klyss, à Zurich, par le professeur Ackeret et le docteur Keller. Ces deux inventeurs suisses avaient pris les premiers brevets de 1935 et réalisé une première installation pilote de 2 000 kW en 1939 chez Escher-Klyss notamment qui a envisagé la première l'utilisation de l'hélium comme agent moteur. La General Atomic Co suit aujourd'hui la même voie. Signalons aussi que la Kraftwerk Union A.G. étudie actuellement une turbine solaire. ■



Ci-dessus :  
L'une  
des dernières  
utilisations de  
la turbine  
à gaz.  
La centrale  
de Vitry-sur-  
Seine.  
Elle est en service  
depuis 1971.  
Ci-contre :  
un groupe  
électrogène  
mobile



France, la SNCF a fait fonctionner pour la première fois, le 25 avril 1967, un « turbotrain » muni d'une turbine à gaz de 810 kW d'origine aéronautique fournie par Turbomeca. Une locomotive analogue, d'une puissance légèrement supérieure, a été fournie par le même constructeur aux chemins de fer britanniques. Depuis cette époque, d'autres locomotives de ce type ont été construites, principalement en Angleterre et en Amérique. Mais les considérations économiques font que la turbine à gaz n'est pas encore un vrai concurrent du moteur Diesel dans le transport ferroviaire.

Dans la traction navale, une première installation expérimentale à turbine à gaz a été réalisée à bord d'une canonnière anglaise par le Metropolitan-Vickers en 1947. C'était, en fait, un moteur d'avion turboréacteur déjà mis au point par la maison, auquel avait été ajoutée une turbine à quatre étages pour entraîner l'hélice. C'est aussi en Angleterre que, pour la première fois, un bateau de la marine marchande, le pétrolier « Auris », a été équipé avec une turbine, en 1951, par British Thomson Houston. Aux Etats-Unis, une expérience a été entreprise sur le bateau « Liberty Ship » et ensuite sur le transatlantique « John Sergeant », mis par une turbine à gaz de 5500 kW construite par General Electric Co, mise en service en 1956. Mais très peu de bateaux sont équipés avec des turbines à gaz. Dans la navigation comme dans les autres domaines de transport, à part l'aviation, la turbine à gaz n'a pas encore atteint les performances pour la rendre vraiment concurrentielle.

### Pour l'automobile l'adaptation comporte deux turbines indépendantes

Dans l'automobile, la plupart des grands constructeurs ont étudié des projets. L'adaptation pour l'automobile comporte deux turbines indépendantes : une pour le compresseur, l'autre pour la transmission, les roues motrices d'une voiture tournant à une vitesse constamment variable. C'est l'Anglais Rover qui, en juin 1952, réalise le premier record du monde de vitesse.

Les progrès ont permis en 1963 la construction de la première série de cent voitures Dodge mues par turbine à gaz Chrysler. Pourtant, certains inconvénients, dont le rendement inférieur, la vitesse de rotation élevée, le bruit désagréable,

le prix de fabrication font encore aujourd'hui que cette solution ne s'est pas imposée dans la construction automobile.

### Utilisation pour des groupes électrogènes mobiles

La turbine à gaz a été employée également comme source d'énergie dans les installations fixes. Pour la production électrique, elle est utilisée surtout comme source d'énergie de pointe et de secours dans les petites centrales mobiles (groupes électrogènes) ; dans les centrales thermiques de grande puissance, il n'est pas envisageable qu'elle remplace vraiment la turbine à vapeur, car elle travaille à pression plus faible : pour la même puissance, les turbines à gaz doivent donc être beaucoup plus grandes. C'est seulement après les années 50 que les premières centrales électriques à turbines à gaz sont réalisées, bien que des installations expérimentales aient été conçues déjà avant la Seconde Guerre mondiale. C'est Brown-Boveri qui réalise les premières installations de centrales électriques à turbine à gaz, comme celle de Beznau (Suisse), Livourne (Italie, 1954), Porte Mann (Canada, 1959), Vahr (Allemagne), etc. Dans la même spécialité apparaissent rapidement un autre suisse, Sulzer, les français Rateau, Compagnie électromécanique et Snecma, les anglais Bristol-Siddeley, English Electric et Metropolitan-Vickers, les américains General Electric et Westinghouse, le suédois Delaval Ljungström. Ces turbines atteignent jusqu'à 60 000 kW. Les mêmes firmes fabriquent également des turbines de moyenne puissance. Elles sont généralement d'une construction plus simple, sans réchauffement et refroidissement intermédiaires. On les utilise pour les groupes électrogènes mobiles pour la production d'air comprimé ; pour les stations de pompes du gaz naturel, pour les soufflants des hauts fourneaux et fours métallurgiques, etc. Des turbines à gaz de petite puissance furent également conçues. En France, vers 1970, la Sermel avait mis au point une gamme complète de turbines à gaz miniatures (100 kW) d'encombrement et de masse spécifique très faibles, certaines fonctionnant avec une roue de turbine libre.

ALEXANDRE HERLEA