

# VOICI LA PREMIÈRE LOCOMOTIVE A TURBINE A GAZ

par Pierre DEVAUX

Ancien Élève de l'École Polytechnique

*Le plus séduisant et le plus simple — en principe — de tous les moteurs thermiques est la turbine à gaz (1). Depuis quelque cent cinquante ans, on peut la considérer comme « inventée », mais elle n'a pu être vraiment réalisée dans des conditions de rendement acceptables que depuis que la métallurgie a pu fournir des alliages conservant leurs propriétés mécaniques à des températures de l'ordre de 600° C. Cependant, si l'on met à part les turbocompresseurs d'avions, fonctionnant sur l'échappement des moteurs à explosion, ses applications industrielles étaient encore limitées à quelques centrales utilisant des sous-produits gazeux. Voici qu'elle pénètre aujourd'hui dans le domaine de la traction sur rail. La nouvelle locomotive des Chemins de fer suisses, qui vient d'effectuer ses essais avec succès, possède tous les avantages des locomotives à vapeur les plus modernes, avec un rendement accru, sans pourtant atteindre celui de la locomotive à moteurs Diesel. Rien ne semble plus s'opposer à ce que la turbine à gaz équipe bientôt les véhicules automobiles routiers, en attendant que l'on parvienne à lui donner un poids au cheval compatible avec son installation à bord d'un avion.*

**D**EPUIS les premières locomotives à vapeur, les progrès de la traction sur rail ont été certes considérables, mais, jusqu'à ces dernières années, ils se poursuivaient à un rythme incomparablement moins rapide que ceux des autres modes de locomotion modernes : sur route et dans les airs. Tandis que les Salons de l'automobile et de l'aéronautique démodaient chaque année les derniers modèles de l'année précédente, on considérait qu'un type de locomotive qui n'avait que six ans était encore tout récent. Cette lenteur du progrès de la traction sur rail tenait sans doute à l'absence de rivaux sérieux dont a joui pendant près de cent ans le chemin de fer. Et la preuve en est que devant la concurrence souvent victorieuse de l'automobile, le chemin de fer a, depuis les deux dernières décades, fait appel, en matière de propulsion, aux solutions les plus hardies de la technique moderne.

C'est ainsi que, dans ces toutes dernières années, la S.N.C.F. a mis à l'étude un certain nombre d'engins de traction répondant à des conceptions techniques inédites. Nous citerons, par exemple, la locomotive à turbines Schneider qui vient précisément d'effectuer des essais très réussis sur la ligne de Paris à Lyon et qui constitue, avec la solution hardie de ses trois turbines réversibles tournant à 10 000 tours/mn, une brillante réussite technique. Le « train-bloc » Bugatti (2), avec ses multiples moteurs à vapeur, alimentés sous 50 hectopièzes (3) et

entraînant directement les roues, constitue une solution « légère » très différente, convenant aux rames aérodynamiques intermédiaires entre le train et l'autorail. La locomotive Diesel électrique à grande puissance a fait ses preuves avec les deux unités de 4 000 ch mises en service avant les hostilités par la région Sud-Est, et qui sont capables de remorquer des trains de 600 tonnes, de Paris à Menton (soit 1 111 km) en neuf heures; l'opportunité d'une telle réalisation ne saurait être sous-estimée, si l'on songe que sur ce parcours à profil très variable, comportant notamment les longues rampes de Dijon et de Fréjus, on n'utilisait pas moins de sept locomotives successives, alternativement du type « Mountain » et « Pacific » (1)! Nous avons tenu nos lecteurs au courant des essais de la très curieuse locomotive à chaudière Velox (2) à « explosion continue », dotée d'un foyer sous pression d'où les gaz enflammés s'échappent à travers une chaudière tubulaire. On obtient dans ces conditions une vaporisation presque instantanée et qui s'effectue avec un très bon rendement. La chaudière Velox autorise des puissances élevées et une extrême souplesse de marche.

Mais la plus révolutionnaire des formules nouvelles est sans conteste la locomotive à turbine à gaz, réalisée pour les Chemins de Fer Fédéraux Suisses par la Société Brown-Boveri.

(1) La locomotive de type « Mountain » correspond à la formule 2-4-1, c'est-à-dire qu'elle possède quatre essieux moteurs accouplés, un bogie à quatre roues motrices (au démarrage) à l'avant et un essieu porteur à l'arrière. La « Pacific » a pour formule 2-3-1. Elle possède trois essieux moteurs accouplés, un bogie à l'avant et un essieu porteur à l'arrière.

(2) Lire : « L'avenir du propulseur d'avions turbine à vapeur et turbine à gaz », dans *La Science et la Vie*, n° 279, novembre 1940.

(1) Lire : « La turbine à gaz, moteur thermique de demain », dans *La Science et la Vie*, n° 287, juillet 1941.

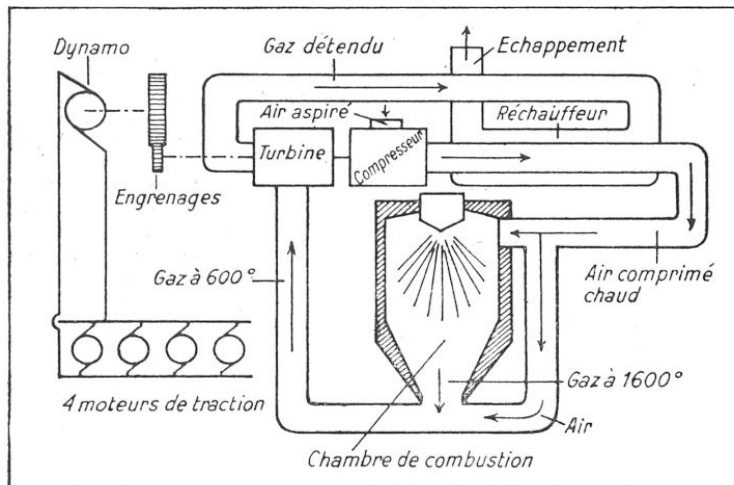
(2) Lire : « Trains légers et trains lourds se disputent l'hégémonie du rail », dans *La Science et la Vie*, n° 272, février 1940.

(3) L'hectopièze vaut 0,987 atmosphère.

### Le principe de la turbine à gaz

La turbine à gaz est le plus simple des moteurs thermiques qu'on puisse imaginer. On pourrait la définir par une « proportion » : elle est au moteur à explosion ce que la turbine à vapeur est à la machine à vapeur à piston. Le fluide moteur est ici constitué par des gaz chauds produits dans une chambre de combustion (fig. 1), mais ces gaz, au lieu de se détendre en poussant un piston, se détendent ici

de la turbine. C'est à cette température que les gaz doivent être refroidis par l'addition d'une quantité convenable d'air comprimé. Ce mélange d'air froid au fluide moteur offre des inconvénients : il diminue le rendement théorique de l'engin en abaissant la température de la « source chaude ». Mais avant d'avoir le meilleur rendement possible, l'engin doit pouvoir supporter un service qui permette d'amortir sa construction. Le réchauffage de l'air à l'admission permet de récupérer une partie des calories perdues à l'échappement.



T W 17753

FIG. 1. — SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA LOCOMOTIVE A TURBINE A GAZ ET TRANSMISSION ÉLECTRIQUE

L'air aspiré dans l'atmosphère est comprimé par le compresseur et réchauffé dans un échangeur de températures récupérant les calories des gaz d'échappement. Une partie de cet air va à la chambre de combustion et produit avec le combustible un flux de gaz chauds à 1600° C, l'autre partie vient se mélanger aux gaz brûlés et abaisse leur température aux environs de 500-600° C. Le mélange ainsi obtenu se détend à travers une turbine tournant à la vitesse de 5200 tours/mn, puis va échanger sa température avec l'air comprimé froid à l'admission. L'arbre de la turbine actionne à la fois le compresseur et les essieux de traction par l'intermédiaire d'une transmission électrique dynamo-moteur électrique.

à travers une turbine. Dans le cas du moteur à explosion, le piston est employé pendant une partie du cycle à comprimer l'air comburant. Dans la turbine à gaz, la compression est continue et elle est effectuée par un compresseur mis en mouvement par la turbine.

Dans le calcul du rendement global de l'engin, il convient de tenir compte :

- du rendement théorique tel que le prévoit le théorème de Carnot et qui dépend de la température des gaz à la source chaude (chambre de combustion) et à la source froide (échappement) ;

- du rendement de la turbine ;

- du rendement du compresseur.

A la sortie de la chambre de combustion, les gaz sont animés d'une grande vitesse. Si l'on veut conserver un bon rendement de la turbine, il faut que celle-ci tourne vite. Il n'est bien entendu pas question de l'actionner par des gaz à 1600°. Les progrès de la métallurgie ont permis de réaliser des alliages qui résistent à 600° aux forces centrifuges énormes développées dans les ailettes par la rotation rapide

axial, à plusieurs étages ; l'air atmosphérique, comprimé jusqu'à 4 atm, est envoyé dans le réchauffeur d'air, puis parvient à la chambre de combustion et se sépare en deux parties, dont l'une pénètre dans la chambre de combustion à travers des orifices obliques, tandis que le reste circule dans une double enveloppe assurant l'isolement thermique de la chambre. A la sortie de la double enveloppe, il se mélange au gaz en feu dont il abaisse ainsi la température à une valeur admissible.

Le mélange air-gaz traverse la turbine en se dilatant et en libérant son énergie. Il passe ensuite par le réchauffeur, où une partie de sa chaleur est transmise à l'air arrivant du compresseur en se rendant à la chambre de combustion ; finalement, il s'échappe à l'air libre par des ouvertures pratiquées dans le toit de la locomotive.

La puissance mécanique utile, c'est-à-dire celle de la turbine diminuée de celle qui est absorbée par le compresseur, est transmise par un engrenage au groupe générateur électrique. Le réglage de la vitesse est réalisé en agissant

### 7 800 chevaux pour le compresseur et 2 200 pour la traction !

La figure 1 montre la disposition du groupe turbine à combustion ; il comprend, pour la partie thermique : un compresseur d'air accouplé à la turbine, un réchauffeur d'air, une chambre de combustion, une turbine à gaz.

Le principe de fonctionnement est le suivant : Le gaz moteur est produit dans la chambre de combustion par une combustion continue de combustible liquide injecté dans une atmosphère d'air comprimé. Un refroidissement suffisant des gaz brûlés est assuré par un excédent d'air comprimé.

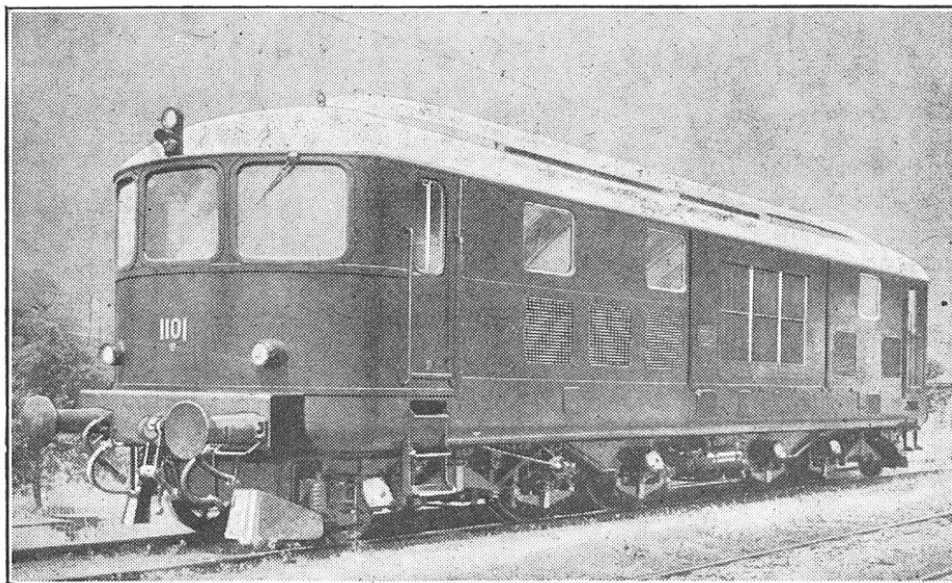
La quantité d'air totale (air de combustion et de refroidissement) est fournie par le compresseur

sur la puissance de la turbine par variation de la quantité de combustible, au moyen d'un système de commande automatique. Le rôle du réchauffeur d'air dans l'amélioration du rendement est important, surtout pour les charges partielles.

Quant au « bilan énergétique » de l'installation, il est paradoxal : la turbine développe effectivement le chiffre formidable de 10 000 ch, dont 7 800 ch sont absorbés par les auxiliaires

en amorcer le fonctionnement, il est nécessaire de porter cet ensemble à une vitesse assez élevée pour que le compresseur assure un débit d'air suffisant à la chambre de combustion ; cette vitesse de démarrage est environ 30 % de la vitesse de pleine charge.

L'énergie nécessaire pour ce lancement est fournie par la génératrice maîtresse, fonctionnant temporairement en moteur alimenté par une génératrice spéciale accouplée à un moteur



T W 17752

FIG. 2. — LA NOUVELLE LOCOMOTIVE A TURBINE A GAZ DES CHEMINS DE FER FÉDÉRAUX SUISSES

Voici les principales caractéristiques de cette locomotive, construite pour la voie normale : longueur, 16,34 m ; poids en service, 92 tonnes ; puissance maximum de la turbine, 2 200 ch ; poids spécifique, 42 kg/ch ; vitesse maximum, 110 km/h.

et notamment par le compresseur, 2 200 ch restant disponibles pour la traction !

L'emploi pratique de la turbine à combustion comme producteur d'énergie s'est heurté pendant longtemps à des pertes internes trop grandes qui ne laissaient aucune puissance disponible. La réussite de l'installation actuelle est due à l'amélioration du rendement du compresseur et de la turbine ; le rendement global dépend essentiellement de la température du gaz avant les aubes de la turbine et de la récupération de chaleur dans le réchauffeur. En outre, les capacités de charge du compresseur et de la turbine ont une grande importance à bord d'une locomotive appelée à des services variés.

Malgré l'apparence désastreuse de son bilan thermique, la locomotive de 2 200 ch des Chemins de Fer Fédéraux Suisses atteint à pleine charge un rendement de 16 %, meilleur que celui des machines à vapeur les plus modernes.

#### Le problème du démarrage

Ainsi construit, l'ensemble turbine-générateur serait incapable de démarrer seul ; pour

Diesel de lancement de 100 ch. Ce Diesel lui-même est lancé à l'aide de son moteur, alimenté par une batterie d'accumulateurs, normalement rechargée, durant la marche, par la génératrice auxiliaire du groupe turbine. L'allumage du combustible dans la chambre est assuré par une « canne » chauffée électriquement.

#### La répartition de la puissance motrice sur les essieux

La locomotive est à voie normale (fig. 2 et 3). Elle a été étudiée en vue de son utilisation sur les lignes principales avec une vitesse maximum de 110 km/h, ainsi que sur les lignes secondaires avec une vitesse plus réduite, mais une inscription satisfaisante dans les courbes de faible rayon. La charge a été calculée sur le maximum de 16 tonnes par essieu.

A cet effet, la « figuration d'essieu » adoptée est : 1 A.-B.-A. 1, c'est-à-dire que le train de roulement comporte un ensemble de deux essieux moteurs au centre, solidaire du châssis de caisse, encadré entre deux bogies ayant chacun un essieu moteur et un essieu porteur. Les prin-

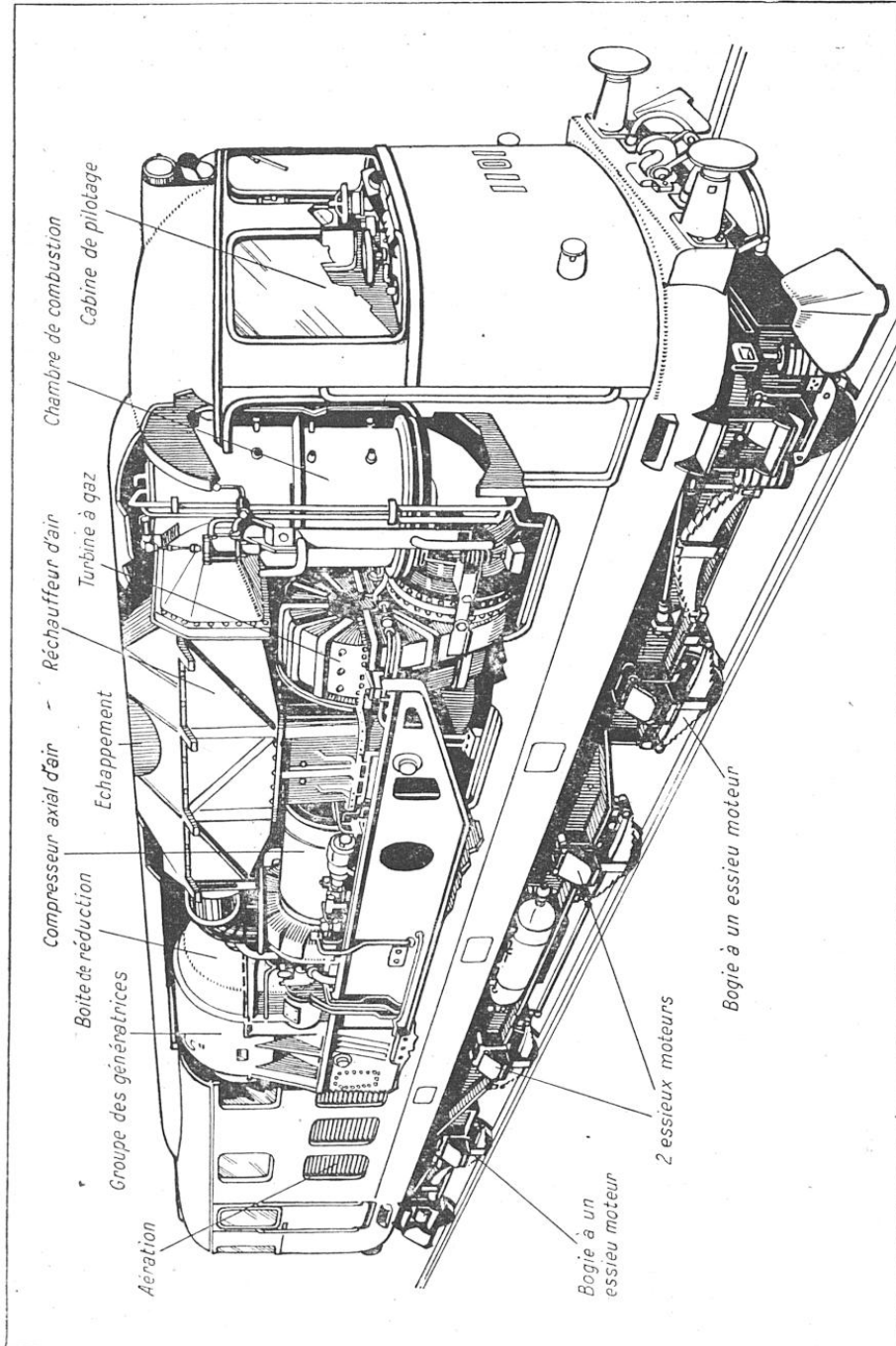


FIG. 3. — LA LOCOMOTIVE A TURBINE A COMBUSTION ET A TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE 2 200 CH DES CHEMINS DE FER SUISSES

T W 17755

cipes d'allégement adoptés pour la partie mécanique ont permis de ne pas dépasser 32 tonnes pour celle-ci; la locomotive est réversible; elle possède une cabine de conduite à chaque extrémité, entre lesquelles la caisse est subdivisée en trois compartiments, l'un pour la turbine à gaz de 10 000 ch et la chambre de combustion, l'autre pour le compresseur axial, et le dernier pour le groupe de génératrices entraînées par la turbine, ainsi que par les auxiliaires de service et de commande.

### La transmission électrique

Les 2 200 chevaux disponibles sur l'arbre de la turbine à gaz ne sont pas transmis directement aux roues de la locomotive; ils sont utilisés pour faire tourner une dynamo génératrice à excitation réglable, qui alimente les moteurs de traction. C'est la solution classique de la transmission électrique, qui a fait ses preuves, tant à bord des locomotives Diesel-électriques de 4 000 ch de la région Sud-Est qu'à bord des navires. Malgré son rendement global, nécessairement inférieur à celui d'une transmission mécanique, ce mode de propulsion assure une souplesse de conduite qui se traduit finalement par des horaires améliorés et une consommation diminuée.

La locomotive à turbine à transmission électrique est constituée par des éléments connus et sa construction ne diffère de celle d'une locomotive Diesel-électrique que par la nature de l'installation thermique; l'expérience actuellement acquise dans les diverses techniques a permis d'assurer du premier coup un fonctionnement satisfaisant.

La partie électrique principale comporte : la génératrice maîtresse, fournissant le courant continu de traction; la génératrice auxiliaire, alimentant les auxiliaires en courant continu; enfin, un alternateur de chauffage du train. La vitesse de la turbine à pleine charge est de 5 200 tours/mn (environ 90 tours par seconde) et la vitesse correspondante du groupe des génératrices est de 812 tours/mn.

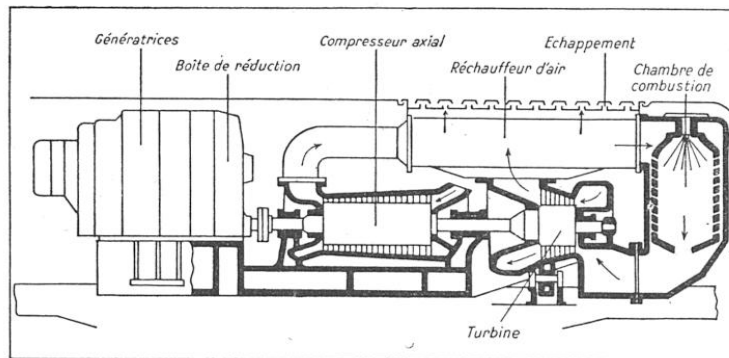
Les moteurs de traction, au nombre de quatre, sont constamment branchés en parallèle; leur circuit d'alimentation comporte des relais à maximum de courant, des contacteurs de séparation et un inverseur de marche. La génératrice maîtresse a une puissance continue de 1 145 kW avec 1 790 A sous 665 V à 750 tours/mn. Elle est à excitation composée, comportant un enroulement d'excitation shunt, un autre d'excitation séparé et un troisième anticompound qui empêche le courant débité de dépasser la valeur maximum nécessaire au démarrage de la locomotive.

La génératrice auxiliaire est à excitation shunt et fournit 42 kW sous tension de 155 V, maintenue constante par un régulateur rapide. L'alternateur de chauffage a une puissance de 200 kW et fournit son courant sous une tension

de 1 000 volts, également maintenue constante par un régulateur.

Les quatre moteurs de traction ont une puissance individuelle, en régime continu, de 265 kW; ils transmettent leur effort aux essieux au moyen de tourillons creux à accouplement élastique.

Outre l'appareillage ci-dessus, l'installation comporte : un groupe moto-compresseur d'air, un groupe moto-pompe pour le combustible, un groupe moto-pompe à huile pour les comman-



T W 17754

FIG. 4. — DISPOSITION SCHEMATIQUE DES ORGANES DE LA TURBOGENÉRATRICE

des auxiliaires à huile sous pression et pour le graissage.

Il est à noter que le groupe auxiliaire Diesel-dynamo peut être utilisé pour alimenter directement un des moteurs de traction, ce qui permet d'assurer les manœuvres de la locomotive haut-le-pied sans utiliser le groupe turbine. Les différentes manœuvres pour le démarrage sont effectuées du compartiment des machines, tandis que, durant la marche, la commande de toute l'installation se fait de la cabine du mécanicien alors en service. Après la mise en marche du groupe Diesel, le démarrage du groupe turbine à combustion demande environ trois minutes.

### La conduite de la locomotive

La locomotive étant destinée à être servie par un seul homme a été équipée d'ingénieux dispositifs automatiques de sécurité et de régulation. La conduite de la machine se fait au moyen d'une commande à manette agissant sur la quantité de combustible injecté. Supposons que le conducteur accroisse l'injection; la vitesse de la turbine augmente, provoquant l'intervention d'un « servo-régulateur de champ » qui augmente l'intensité du courant d'excitation séparée de la dynamo maîtresse; la tension d'alimentation fournie aux moteurs de traction se trouve ainsi accrue, la locomotive accélère. Le fonctionnement est inverse en cas de commande de ralentissement. Le servo-régulateur intervient également lors des variations du profil de la voie, une parfaite concordance fonctionnelle se trouvant constamment assurée entre la partie thermique et la partie électrique de la locomotive.

Il est essentiel d'assurer au gaz pénétrant dans la turbine les meilleures conditions de température en dépit des changements extérieurs : va-

riation de la température de l'air, de la pression barométrique, de la qualité du combustible, etc. A cet effet, une valve de correction peut être manœuvrée par le mécanicien suivant la température des gaz en amont de la turbine, qui lui est indiquée par un pyromètre avec lecture à distance; cette valve agit comme freinage dans le circuit de commande à huile sous pression qui contrôle l'injection du combustible.

L'allumage de la flamme est signalé par des lampes-témoins dans le compartiment des machines et dans la cabine du mécanicien. Lors d'irrégularités dans le fonctionnement, élévation exagérée de la vitesse, extinction de la flamme, trop haute température des gaz à l'entrée dans la turbine, baisse de la pression d'huile de graissage par suite d'une rupture de canalisation, etc., la pompe à combustible s'arrête automatiquement et la turbine ralentit jusqu'à l'arrêt.

#### Comparaison avec la locomotive à vapeur et la locomotive Diesel-électrique

Il n'y a pas à se dissimuler que la solution hardie de la turbine à gaz, combinée avec la transmission électrique, assure un rendement global notablement inférieur à celui d'une locomotive Diesel utilisant le même combustible.

Le rendement est cependant notablement supérieur à celui des meilleures locomotives à vapeur (12 %).

La locomotive à turbine possède la plupart des avantages de la locomotive à vapeur : simplicité, conduite facile, adaptation aux exigences du trafic, sans ses inconvénients. La vapeur exige beaucoup de charbon et beaucoup d'eau : environ 1 kg de charbon et 8 kg d'eau par cheval-heure à la jante; la locomotive à turbine n'utilise pas d'eau.

Pour la traction à grande vitesse sur de lon-

gues distances, la locomotive à vapeur n'est pas économique; en outre, les difficultés s'accroissent dans les pays où l'eau est rare ou très chargée de sels minéraux. La locomotive à turbine et à combustion remplace alors avantageusement la locomotive à vapeur.

Quant à la locomotive Diesel-électrique, son rendement est double de celui de la locomotive à turbine à gaz. Elle est économique et a fait ses preuves pour les services de manœuvre; dans les grandes puissances, elle semble bien surclasser la vapeur pour les rapides à grande distance sur fortes et longues rampes. Par contre, elle exige de l'huile Diesel très pure; un moteur Diesel, suralimenté, développant 2200 ch, consomme au trois quarts de sa charge 162 g d'huile combustible par cheval-heure; pour la même puissance, une locomotive à turbine à combustion consommera 360 g d'une huile brute deux fois moins chère, en sorte qu'il y a presque compensation pour le prix de revient de l'énergie. Dans le cas du moteur Diesel, une grande partie de l'huile de graissage est en outre brûlée dans les cylindres. L'extrême simplicité d'une installation à turbine à combustion se traduit, d'autre part, par des frais d'entretien très inférieurs à ceux des installations Diesel. A puissance égale de la partie thermique, la locomotive à turbine est notablement moins lourde et moins chère que la locomotive Diesel.

Intéressante en l'état actuel de la technique, la locomotive à turbine pourra s'améliorer considérablement au point de vue rendement, au fur et à mesure des progrès métallurgiques intervenant dans la construction des ailettes de turbines. Au surplus, la pénurie actuelle d'huile combustible n'est pas un obstacle absolu au développement du nouveau mode de traction, et les constructeurs envisagent dès à présent l'emploi, comme combustible, de charbon pulvérisé.

Pierre DEVAUX

## LES A COTÉ DE LA SCIENCE

### INVENTIONS, DÉCOUVERTES ET CURIOSITÉS

par V. RUBOR

#### Verre filé pour revêtement d'ailes

DES essais ont été effectués sur un avion « Taylor » dont les ailes avaient été recouvertes d'un tissu de verre filé fabriqué dans les vastes laboratoires « Owens Corning Fiberglas », à Newark. Soumis aux influences atmosphériques pendant six mois, ce revêtement n'aurait subi aucune altération. Par rapport aux revêtements ordinairement utilisés, ce tissu

de verre présenterait les avantages suivants : poids moindre, solidité plus grande, résistance accrue aux atteintes des projectiles et à l'inflammation. En outre, ce tissu de verre est moins hygroscopique et une humidité considérable n'endommagerait en rien ce matériau dont le poids ne serait que très peu accru. Son seul inconvénient serait de ne se rétrécir que de 2 % sous l'effet de l'enduit dont on recouvre les revêtements, contre 10 à 12 %. Il faut donc le tendre sur l'aile très fortement dès sa mise en place.

#### La "Supermountain" de 300 kg

LA locomotive (réduction au 1/10 d'une « Supermountain »), établie de toutes pièces par M. Orif, constitue non seulement une curiosité, mais un chef-d'œuvre de l'artisanat français : 5 380 pièces usinées en six années de travail consécutif ont été nécessaires pour mener à bien cette tâche.

Voici ses caractéristiques : Longueur, tender compris :