

605.285.814

L'élément automoteur expérimental à turbine à gaz de la S.N.C.F.

L'accroissement de la vitesse commerciale des trains de voyageurs est depuis bien longtemps une des principales préoccupations des réseaux et un effort soutenu a été accompli dans ce domaine par les plus importants d'entre eux et par les constructeurs pour réaliser des matériels roulants de plus en plus rapides et confortables, en même temps que les techniques de construction et d'entretien de la voie évoluaient parallèlement ⁽¹⁾.

Les progrès de la technique des moteurs à combustion interne ⁽²⁾, qui avaient permis le développement progressif des transports routiers après la première guerre mondiale, conduisirent les réseaux et certains constructeurs de matériels roulants à envisager, vers 1930, l'application de ces moteurs à la traction d'automotrices ou trains automoteurs rapides de construction allégée par rapport à celle des matériels classiques ⁽³⁾, en vue d'augmenter la vitesse commerciale et aussi de réaliser une exploitation plus souple permettant une plus grande fréquence des services.

C'est ainsi qu'apparurent peu après 1930 sur la plupart des réseaux importants les premières automotrices rapides et qu'en France, l'ancien réseau de l'Etat mit en service, dès 1933, des autorails rapides sur la relation Paris-Rouen-Le Havre, suivit très peu après par les anciens réseaux du Nord et du P.L.M., respectivement sur les relations Paris-Lille-Roubaix-Tourcoing, Paris-Vichy-Clermont-Ferrand et Paris-Lyon. Des services analogues furent ensuite établis sur quelques autres relations jusqu'à la seconde guerre mondiale.

Les vitesses commerciales de ces services étaient de 100 km/heure ou très voisines, mais les vitesses maximales que ces engins pouvaient développer étaient nettement supérieures. En particulier, l'autorail Bugatti « Présidentiel » équipé de quatre moteurs à essence Royal Bugatti, atteignait, en 1937, la vitesse de 196 km/h sur la ligne Paris-Le Mans. Ce record de vitesse sur rails fut d'ailleurs battu deux ans plus tard, en Allemagne, par le train automoteur Kruckenberg-Westwaggon, à moteur Diesel et transmission hydraulique qui, atteignit la vitesse de 215 km/h sur la ligne Berlin-Hambourg ⁽⁴⁾.

(1) Voir l'étude de M. R. DERNIAME sur l'évolution récente de la super-structure ferroviaire dans le *Génie Civil* de mai 1967, ainsi que celle de M. Y. MACHEFERT-TASSIN sur les très grandes vitesses sur rails dans le *Génie Civil* du 15 décembre 1966.

(2) Ce terme englobant les moteurs à allumage commandé (moteurs à explosion) et les moteurs à allumage par compression (moteurs Diesel).

(3) Les moteurs à combustion interne avaient déjà fait l'objet de diverses applications pour des services sur lignes secondaires ou d'intérêt local, mais essentiellement en vue de réduire les dépenses d'exploitation sur les lignes à faible trafic, dès avant la première guerre mondiale et ces applications s'étaient développées après cette guerre en raison de la situation économique plus difficile des réseaux.

(4) Ces records concernent uniquement des engins en service commercial ou prévu pour le service commercial. Un engin purement expérimental, propulsé par hélice, le Zeppelin sur rail Kruckenberg avait atteint en 1932, la vitesse de 230 km/h ; le poids du véhicule était de 20 t et la puissance du moteur de 600 ch. En 1966, aux Etats-Unis, un autorail R.D.C. (Rail Diesel Car) équipé de deux turbo-réacteurs a atteint la vitesse de 296 km/h, cet essai ayant été entrepris uniquement pour montrer la possibilité de circulation à très grande vitesse d'un engin léger sur une voie non entretenue depuis plusieurs années.

Ces records, établis sur engins à moteurs thermiques, furent largement battus par les engins de traction électrique le 21 février 1954 sur la section Dijon-Beaune de la ligne Paris-Lyon par la locomotive CC 7121 qui, sans aucune modification, atteignit la vitesse de 243 km/h en remorquant une rame de trois voitures d'un poids total de 111 t, puis les 28 et 29 mars 1955 sur la section Lamothe-Morcenx de la ligne Bordeaux-Dax respectivement par la locomotive CC 7107 et la locomotive BB 9004 qui atteignirent l'une et l'autre la vitesse de 331 km/h en remorquant une rame de trois voitures comme dans le précédent record. Les trois locomotives ayant établi ces records étaient en service régulier, mais pour le dernier record les rapports d'engrenages avaient été modifiés et des dispositions particulières avaient été prises pour l'alimentation de la caténaire dans des conditions qui ont été exposées dans le *Génie Civil* du 15 octobre 1955. Le record reste toujours le record mondial de vitesse sur rail toutes catégories d'engins.

Le record de vitesse des engins à moteurs thermiques a été porté à 238 km/h, le 30 novembre dernier, entre Vierzon et Les Aubrais (Région Sud-Ouest), par l'élément automoteur expérimental à turbine à gaz réalisée par la Société Nationale des Chemins de fer Français en vue d'étudier les possibilités des turbines à gaz de type aéronautique pour la construction d'éléments automoteurs capables de vitesses du même ordre qu'en traction électrique, soit 250 km/h de vitesse maximale.

Nous nous proposons de décrire cet élément automoteur (fig. 1) qui a été réalisé par transformation d'un élément automoteur de 330 kW (425 ch), dont la description a été donnée dans le *Génie Civil* du 1^{er} décembre 1964.

Auparavant, nous pensons devoir rappeler brièvement les précédentes applications de la turbine à gaz en traction ferroviaire et exposer les avantages offerts par la turbine à gaz dans le domaine des grandes vitesses sur rail.

LA TURBINE A GAZ EN TRACTION FERROVIAIRE

Les premières applications de la turbine à gaz à la traction ferroviaire furent réalisées sur locomotives. Dès 1933, circula en Suède une locomotive à turbine à gaz avec générateur de gaz constitué par un moteur Diesel à pistons opposés ⁽⁵⁾, mais la première locomotive à turbine à gaz à compresseur axial fut étudiée et construite en 1941 par la Société Brown Boveri pour les parties thermique et électrique et la Société Suisse de Locomotives et de Machines, pour la partie mécanique. Mise en service sur les lignes des Chemins de fer Fédéraux Suisses (immatriculation 1101), elle était équipée d'une turbine à un seul arbre avec cycle à récupération de chaleur, développant une puissance de 2 200 ch et d'une transmission électrique ⁽⁶⁾.

(5) La première locomotive à turbine à gaz était donc à turbine libre.

(6) Cette locomotive a été décrite dans le *Génie Civil* du 15 avril 1943.

L'élément automoteur expérimental à turbine à gaz de la S.N.C.F.



Après la seconde guerre mondiale, la locomotive à turbine à gaz retint l'attention de plusieurs réseaux européens et américains. La S.N.C.F. procéda à des essais en exploitation de la locomotive 1 101 précitée sur les lignes de la Région Est. En Grande-Bretagne, le Great Western Railway commanda, en 1946, à la Société Brown Boveri une locomotive à turbine à gaz d'une puissance de 2 500 ch, qui fut mise en service en 1950 par les Chemins de fer Britanniques, lesquels commandèrent à la Metropolitan Vickers Electrical Co une locomotive à turbine à gaz et transmission électrique qui fut mise en service en 1952 (immatriculation 18100). Aux Etats-Unis, l'Union Pacific Railroad procéda à des essais en 1947, sur une locomotive prototype de 4 800 ch et commanda à l'American Locomotive Co, en 1951, une première série de dix locomotives suivie peu après d'une série de quinze, qui furent toutes équipées de turbines à gaz General Electric Co. Ces deux séries furent suivies, en 1958, par une série de trente locomotives d'une puissance de 8 500 ch, qui a été ensuite portée à 10 500 ch.

De toutes ces locomotives à turbines à gaz ne restent actuellement en service que trente et une unités de l'Union Pacific Railroad, les autres ayant été transformées en locomotives électriques ou en locomotives à moteurs Diesel.

Ce développement de la locomotive à turbine à gaz, très restreint en Europe et assez limité aux Etats-Unis, s'explique par les progrès réalisés dans la construction des moteurs Diesel de traction ferroviaire après la seconde guerre mondiale, surtout au point de vue de l'allègement par accroissement de la vitesse de rotation, par la fabrication de ces moteurs en séries relativement importantes aux Etats-Unis, ainsi que par la consommation spécifique des turbines à gaz environ double de celle des moteurs Diesel, qui n'est que partiellement compensée par la possibilité de brûler un combustible plus lourd, donc moins coûteux, ou par l'emploi d'un récupérateur de chaleur. D'autre part, la puissance massique plus élevée que celle des moteurs Diesel ne pouvait constituer un facteur décisif dans le cas de locomotives.

L'application de la turbine à gaz aux automotrices ou trains automoteurs ne fut pas envisagée ni par les réseaux ni par les constructeurs car la conception des turbines à gaz montées sur locomotives dérivait de celle des turbines à gaz industrielles, elle-même dérivée de celle des turbines à vapeur et n'était pas adaptée à la gamme de puissances des automotrices ou trains automoteurs. La nécessité de garantir une durée de service du même ordre que celle des moteurs Diesel ne permettait pas d'adopter les températures d'admission à la turbine en usage dans la construction des turbines à gaz d'aviation, pour lesquelles on admettait une durée de service généralement inférieure 1 000 h. En outre, la consommation spécifique nette-

ment plus élevée que celle des moteurs Diesel suralimentés et le prix plus élevé, faisaient passer au second plan les avantages de la turbine à gaz : absence à peu près complète de vibrations, besoins très réduits en graissage et refroidissement, endurance, simplicité d'entretien. Les turbines à gaz d'aviation sont, au contraire, parties de la recherche d'une puissance spécifique élevée, en vue de la propulsion par réaction, et d'une conception simple à la fin de la seconde guerre mondiale (turbo-réacteur Jumo des avions de chasse allemands et Derwent Rolls Royce des avions de chasse britanniques), leur consommation spécifique était également très élevée (300 g/ch.h) et dépassait nettement celle des moteurs à piston d'aviation, qui sous leur forme la plus évoluée à injection directe d'essence et turbines d'échappement (moteur Wright Turbocyclone) s'était abaissé à moins de 200 g/ch.h. Dans ces conditions l'avenir de la turbine à gaz aurait été très limité dans le domaine des transports, même aériens et elle n'aurait vraiment été appliquée que dans l'aviation militaire. Mais les efforts continus des constructeurs de turbines à gaz d'aviation, au double point de vue de la conception et de la réalisation, ainsi que ceux des métallurgistes dans l'élaboration des alliages réfractaires ont permis d'améliorer considérablement les performances et d'abaisser la consommation spécifique jusqu'à 180 g/ch.h., donc de l'ordre de celle des moteurs Diesel, pour les plus récents turbopropulseurs Tyne.

Les progrès considérables ainsi réalisés depuis une quinzaine d'années dans la construction des turbines à gaz d'aviation aux points de vue de l'accroissement de la puissance massique, de la fiabilité et de la longévité, de l'abaissement de la consommation spécifique et aussi de la diminution des prix résultant de la fabrication en séries relativement importantes, ayant profondément modifié cette situation, quelques réseaux ont été conduits à étudier l'application des turbines aux automotrices ou trains automoteurs rapides en traction autonome.

Les performances de ces matériels se trouvent en effet limitées actuellement par l'encombrement et l'insuffisance de puissance massique des moteurs Diesel et ne peuvent ainsi atteindre les très grandes vitesses réalisées en traction électrique. La puissance massique des turbines à gaz d'aviation permet de réaliser les fortes puissances nécessaires à la traction aux très grandes vitesses et leur faible encombrement autorise une diminution du maître couple des voitures (fig. 2) donc de la résistance à l'avancement et par suite de la puissance nécessaire à la traction. A titre d'exemple, pour la vitesse de 250 km/h, la puissance nécessaire à la traction d'un élément automoteur conçu pour l'équipement avec turbine à gaz est environ 60 % de celle nécessaire à un élément de même capacité conçu pour l'équipement avec moteur Diesel.

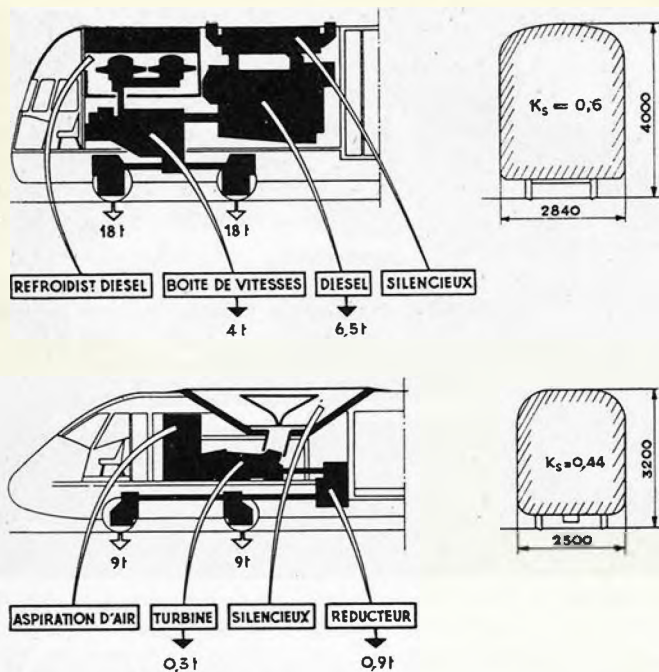


FIG. 2. — Encombrement, maître-couple, répartition des masses et charge par essieu, et coefficient de résistance à l'avancement dans le cas de la traction par moteur Diesel et de la traction par turbine à gaz.

Dans le cas du moteur Diesel, la masse du système de refroidissement est de 2 t et celle du silencieux de 0,4 t.
 Dans le cas de la turbine, la masse du silencieux d'aspiration d'air est de 0,45 t et celle du silencieux d'échappement de 1,2 t et celle du réducteur de 2 t.
 Le K_s du véhicule à turbine peut être réduit à 0,37 en réduisant la hauteur à 3 m.

Quatre réseaux ont particulièrement étudié l'application de la turbine à gaz d'aviation aux automotrices ou trains automoteurs rapides : les Chemins de fer Nationaux du Canada, la Société Nationale des Chemins de fer Français, le Pennsylvania Long Island et le New Haven. Ces deux derniers réseaux effectuant les essais pour compte du High Speed Ground Transportation Project du Département des Transports du Gouvernement des Etats-Unis. Une rame du New Haven est du type United Aircraft dérivé de celle du Canada, l'autre est une automotrice Budd-Garrett à deux turbines et transmission hydraulique, en cours de transformation après une première série d'essais pour la transmission électrique.

Les Chemins de fer Nationaux du Canada ont étudié en collaboration avec la société United Aircraft of Canada, un type de rame automotrice dénommé « Turbotrain », qui doit être mis en service prochainement et dont une description a

été donnée dans le *Génie Civil* de février 1967. Rappelons que la propulsion est assurée par des turbines à gaz à deux arbres dont les turbines libres entraînent les essieux par l'intermédiaire d'une transmission mécanique avec réducteur-inverseur.

La Société Nationale des Chemins de fer Français a mis au point un programme d'étude comportant après le choix du type de turbine, des essais au banc suivi d'essais en ligne sur un engin expérimental afin de permettre la mise au point des problèmes posés par l'utilisation des turbines à gaz sur automotrices ou éléments automoteurs. Cet engin expérimental que nous allons maintenant décrire a été réalisé, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, par transformation d'un élément automoteur de 330 kW (425 ch), afin de procéder aux essais en ligne le plus rapidement possible en évitant les longs délais de réalisation d'un prototype.

ÉLÉMENT AUTOMOTEUR EXPÉRIMENTAL

Le choix d'un élément automoteur, plutôt qu'un autorail, offrait l'avantage de grandes facilités d'installation et de possibilités d'expérimentation en permettant de disposer la turbine et les appareils de mesure et d'enregistrement dans la remorque tout en conservant un compartiment voyageurs suffisant. D'autre part, le moteur Diesel de la motrice évite de faire développer à la turbine un couple à basse vitesse ou à l'arrêt.

L'élément automoteur transformé, immatriculé X 4365-XR 8579 (fig. 1 et 3), est de la quatrième série X 4300, à moteur Diesel Poyaud avec baies frontales basses et grand compartiment de première classe. Ce type d'élément automoteur se trouvait particulièrement désigné pour sa stabilité à grande vitesse (jusqu'à 200 km/h) avec les bogies de série Y 204, 205 et 206, et par les facilités qu'il offrait pour l'adaptation des nouveaux bogies Y 214 spécialement étudiés pour les grandes vitesses.

En plus du montage de la turbine et l'aménagement d'un compartiment laboratoire contigu au compartiment turbine, la transformation comportait :

- le remplacement des bogies Y 204, Y 205 et Y 206 par des bogies du nouveau type Y 214, dérivé du type Y 207 ;

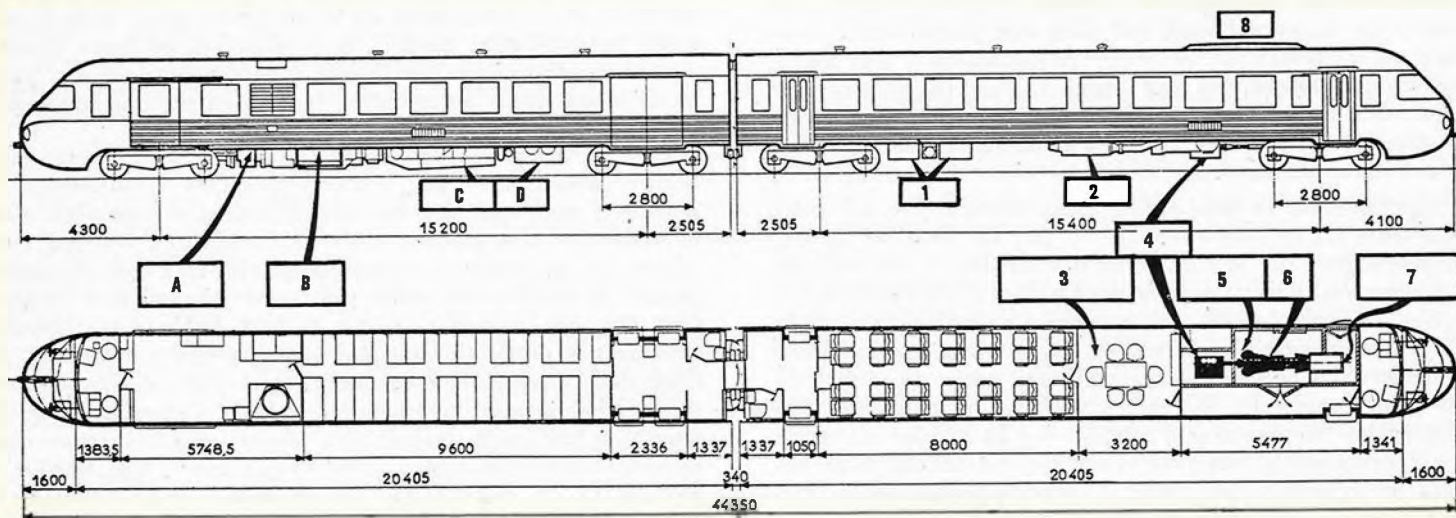
- le carénage des extrémités qui a été réalisé en polyester armé de 5 mm d'épaisseur. Les parois frontales ont été conservées et la protection du personnel a été renforcée par un bouclier constitué d'un caisson cloisonné pouvant absorber par déformation une grande quantité d'énergie et comportant latéralement des tampons hydrauliques assurant la protection dans le cas d'un contact avec un autre engin.

L'étude a été effectuée par la Division des Etudes de Traction par Moteurs Thermiques (DETMT) de la S.N.C.F., en collaboration avec la Direction Technique des Constructions

FIG. 3. — Diagramme de l'élément automoteur expérimental de la S.N.C.F.

Motrice de l'élément automoteur 330 kW.
 A, boîte de vitesse ; — B, moteur Diesel ; — C, réservoir ; — D, équipement de chauffage.

Remorque transformée en motrice à turbine à gaz.
 1, réservoirs de combustibles (gas-oil et P.S.P.) ; 2, équipement de chauffage ; — 3, compartiment laboratoire ; — 4, réducteur-inverseur ; — 5, compartiment insonorisant ; — 6, turbine ; — 7, aspiration ; — 8, échappement.



Aéronautiques (DTCA) du ministère de l'Air, en ce qui concernait le choix de la turbine et les essais préliminaires avant l'adaptation sur l'élément automoteur. La transformation a été réalisée aux ateliers du Mans de la S.N.C.F., le carénage en matière plastique armé ayant été exécuté par les ateliers de Sotteville-Buddicom de la S.N.C.F. et l'engin, actuellement basé au dépôt de Tours-Saint-Pierre-des-Corps, a été renuméroté XAS 2061 pour le véhicule équipé de la turbine et XBSD 4365 pour le véhicule équipé du moteur Diesel.

Nous examinerons successivement la turbine à gaz et son adaptation, la transmission et les bogies Y 214.

Turbine

Les caractéristiques et conditions de fonctionnement des compresseurs et turbines étant telles que, dans les domaines d'utilisation, le couple disponible sur l'arbre croît en fonction de la vitesse dans le cas des turbines à un seul arbre et décroît dans le cas des turbines à deux arbres (générateur de gaz comportant un compresseur entraîné par une turbine et alimentant une turbine motrice dite turbine libre ou de travail), ces dernières sont bien adaptées à la traction et l'allure de leur caractéristique couple-vitesse, quoique moins favorable que celle des moteurs à excitation série de traction électrique, permet cependant dans de bonnes conditions l'entraînement des essieux par une transmission mécanique sans boîte de vitesse (7), dans le cas d'automotrices, de trains automoteurs ou même de locomotives pour services spécialisés, c'est-à-dire, des engins à programme de traction étroit ou peu étendu.

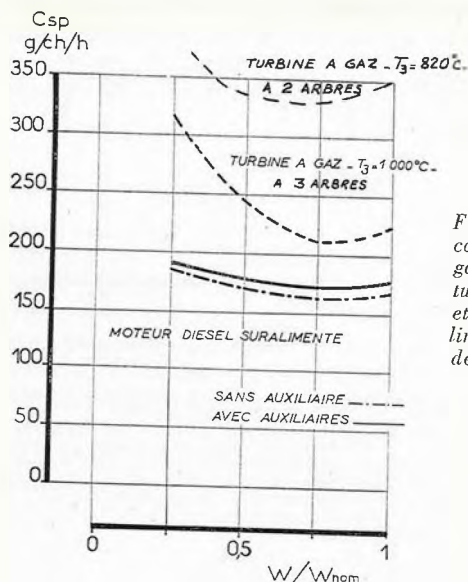


FIG. 4. — Consommation comparée d'une turbine à gaz à deux arbres, d'une turbine à gaz à trois arbres et d'un moteur Diesel suralimenté pour un combustible de pouvoir calorifique inférieur 10 300 kcal/kg.

La température à la sortie de la chambre de combustion, entrée de la première turbine, est de 800 °C et le rapport de compression est de 5,2 au régime de 31 800 tr/mn, valeur réalisant le meilleur compromis entre le rendement et la puissance massique.

La turbine à gaz à deux arbres permet donc, pour de tels engins, des transmissions très simples ne comportant en dehors des arbres et des ponts moteurs qu'un réducteur-inverseur à l'exclusion de tout autre élément mécanique, électrique ou hydraulique. Au contraire, la turbine à un seul arbre implique un embrayage et une boîte de vitesses dans le cas d'une transmission mécanique ou le recours à une transmission électrique ou hydraulique.

(7) Ces conditions se trouvent également réalisées avec les groupes générateurs de gaz à pistons libres-turbines à gaz, qui ont fait l'objet d'une application sous la forme de la locomotive 040 GA 1 de la S.N.C.F., dénommée « turbo-Diesel », dont une description a été donnée dans le *Génie Civil* du 1^{er} octobre 1954. La première locomotive à turbine à gaz mise en circulation était d'ailleurs à turbine libre alimentée par un générateur de gaz constitué par un moteur Diesel.

En raison de cette facilité d'adaptation à la traction de la turbine à gaz à deux arbres, elle a été adoptée par les quatre réseaux précités s'intéressant à la traction par turbine à gaz des automotrices ou trains automoteurs rapides.

Les courbes de la figure 4 donnent les consommations dans le cas de turbines à gaz à deux et trois arbres et d'un moteur Diesel suralimenté.

Dans le cas de la S.N.C.F., la construction française de turbines à gaz d'aviation offrait un type de turbine à gaz à deux arbres, Turmo III C de la Société Turboméca, dont la puissance de 1 100 kW (1 500 ch) sur la turbine libre convenait très bien au type d'élément automoteur retenu pour l'expérimentation, compte tenu d'un fonctionnement à régime réduit pour accroître la longévité et de la traction en association avec le moteur Diesel équipant l'élément dans son état initial.

La Division des Etudes de Traction par Moteurs Thermiques de la S.N.C.F. a donc adopté ce type de turbine à gaz à deux arbres qui se compose (fig. 5) :

— d'un compresseur axial à un étage suivi d'un compresseur centrifuge portant l'air à une pression de 5 bars ;

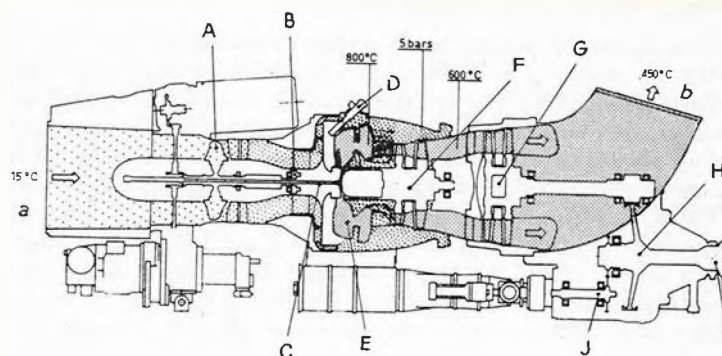


FIG. 5. — Coupe schématique de la turbine à gaz à deux arbres Turmo III C de la Société Turboméca.

A, compresseur axial ; — B, compresseur centrifuge ; — C, chambre de combustion ; — D, allumeur torche ; — E, roue d'injection ; — F, turbine entraînant le compresseur ; — G, turbine libre ; — H, réducteur ; — I, arbre de sortie du réducteur ; — J, refroidisseur d'huile ; — a, entrée d'air ; — b, échappement.

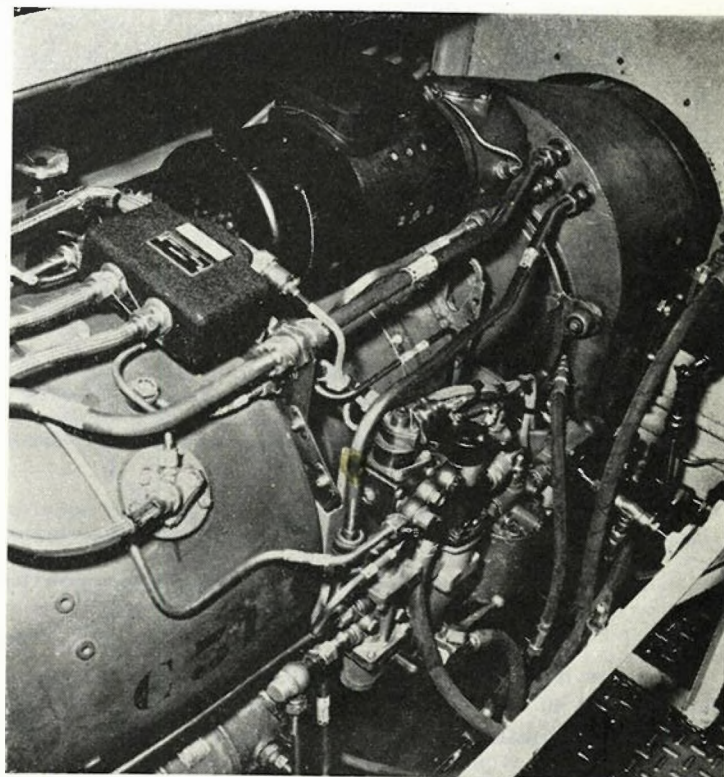


FIG. 6. — La turbine vue de dessus vers l'aspiration.

A la partie supérieure on remarque le démarreur électrique du générateur de gaz, à la partie inférieure l'appareillage d'alimentation en combustible.

— d'une chambre de combustion annulaire avec injection rotative du combustible et allumage initial par deux injecteurs-torches auxiliaires à ignition électrique ; la température des gaz à la sortie de la chambre est de 810 °C. ;

— d'une première turbine à deux étages axiaux entraînant le compresseur à une vitesse comprise entre 25 000 et 33 000 tours-minute environ ;

— d'une seconde turbine (turbine libre ou de travail) également à deux étages axiaux, dont l'arbre est accouplé à un réducteur à pignons droits de rapport 4,03 (vitesses maximales 23 000 tr/mn sur l'arbre turbine et 5 700 tr/mn à la sortie du réducteur) pour l'utilisation en service ferroviaire.

Pour le premier étage de la première turbine les aubes sont en titane et le disque en Nimonic 105, pour le second étage les aubes et le disque sont en Nimocast (alliage type Nimonic coulé).

Pour la seconde turbine, les disques et les aubes sont en Nimonic 90.

La masse du Turmo III C est de 297 kg, sa section hors tout est d'environ 70 cm et sa longueur est de 2 m, soit moins d'un mètre cube d'encombrement total.

La puissance maximale en service ferroviaire a été fixée à 810 kW contre 1 100 kW en service aéronautique afin d'accroître la longévité et l'endurance de la turbine. Cette diminution de puissance maximale admise en service s'accompagne d'un abaissement de la température maximale à la sortie de la chambre de combustion et à l'entrée de la turbine d'environ 100 °C qui réduit nettement les contraintes thermiques sur les parois de la chambre et les ailettes, d'où une plus grande longévité de la turbine. La figure 7 donne la variation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation à la sortie du réducteur pour divers régimes du générateur de gaz.

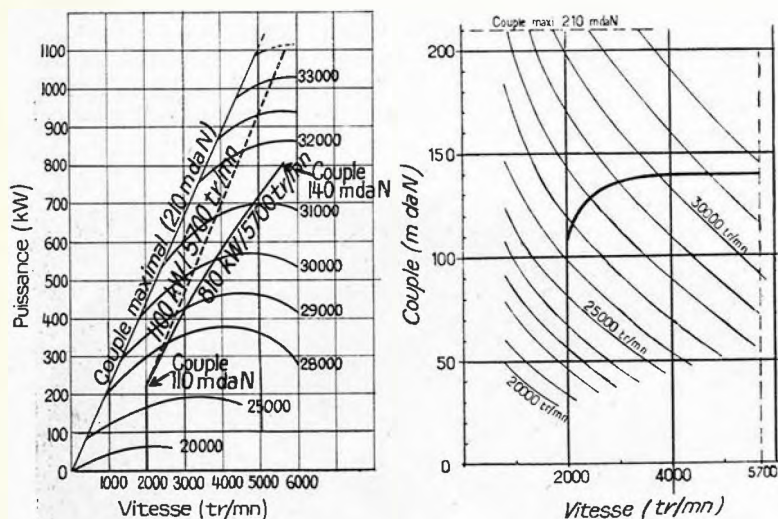


FIG. 7. — Courbes de puissance d'une turbine à gaz à deux arbres Turmo III C en utilisation aéronautique (puissance maximale 1 100 kW) et en utilisation ferroviaire (puissance maximale 810 kW), en fonction de la vitesse à l'arbre de sortie du réducteur pour diverses vitesses du générateur de gaz.

FIG. 8. — Courbes de variation du couple sur l'arbre de sortie en fonction de la vitesse de rotation, pour diverses vitesses du générateur de gaz.

La courbe en trait fort est la courbe limite d'utilisation de la turbine sur l'élément automoteur.

La figure 8 donne la variation du couple sur l'arbre de la turbine libre en fonction de la vitesse sur l'arbre de sortie du réducteur pour diverses valeurs de la vitesse du générateur de gaz (compresseur et première turbine) ; le couple nécessaire pour démarrer l'engin étant d'environ 50 m daN, la turbine pourrait théoriquement à elle seule assurer le démarrage, mais il est apparu préférable de ne pas faire développer de couple à la

turbine à faible vitesse actuellement inférieure à 1 000 tr/mn sur l'arbre de sortie du réducteur, d'où la limitation des courbes à cette valeur sur la figure 6.

Pour la puissance de 810 kW, le régime du générateur de gaz est de 31 800 tr/mn et celui de la turbine libre de 5 700 tr/mn, le débit d'air est de 5,65 kg/s. Au ralenti, le régime du générateur de gaz est de 18 000 tr/mn et celui de la turbine libre de 4 000 tr/mn.

Le kérosène utilisé dans les turbines à gaz d'aviation étant trop coûteux pour l'exploitation ferroviaire, on a expérimenté au banc le fonctionnement de la turbine avec alimentation au gas-oil normalement approvisionné à la S.N.C.F. pour les moteurs Diesel des autorails et locomotives. Le fonctionnement est satisfaisant et la température à la chambre de combustion est pratiquement la même, mais l'allumage initial de la chambre de combustion au démarrage, quoique n'étant pas impossible si la température ambiante est supérieure à 10-15 °C, est évidemment plus difficile que dans le cas du kérosène plus léger et plus inflammable. Une modification des systèmes d'injection et de pulvérisation du combustible permettra vraisemblablement d'améliorer l'allumage, mais pour l'expérimentation, il a été jugé préférable de recourir à un circuit d'alimentation bi-combustible entièrement automatique assurant, pour la période de démarrage, l'alimentation en combustible plus léger P.S.P. (pétrole sans paraffine) couramment approvisionné à la S.N.C.F. pour le chauffage des éléments automoteurs ; la faible consommation de ce combustible par démarrage, seulement 2 à 3 l, et l'automatisme du dispositif de passage d'un combustible à l'autre permettraient d'envisager son utilisation en exploitation. La figure 9 donne le schéma général de l'alimentation en combustible et la figure 10 le schéma du régulateur. Le débit de la pompe d'alimentation en gas-oil est de 600 l/h sous pres-

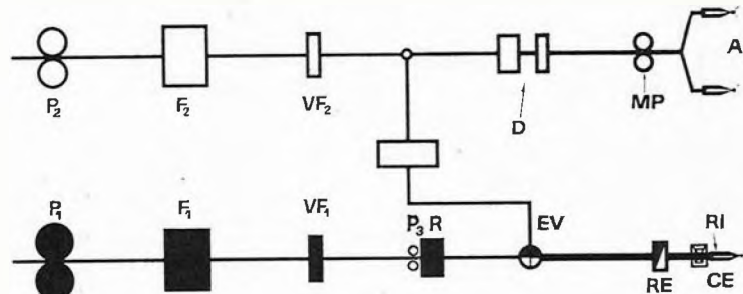


FIG. 9. — Schéma de principe de l'alimentation en combustibles (gas-oil et P.S.P.).

Les indices 1 se rapportent à l'alimentation en gas-oil et les indices 2 à l'alimentation en P.S.P. pour le lancement du générateur de gaz. A, allumeurs torches ; — CE, clapet électromagnétique sécurisé ; — D, détendeur ; — EV, électrovalve à trois voies ; — F, filtre ; — MP, micropompe d'alimentation des allumeurs torches ; P, pompes d'alimentation ; — P3, pompe mécanique de gavage ; — R, régulateur de turbine libre ; — RE, robinet électrique et limiteur d'accélération ; — RI, roue d'injection de la chambre de combustion. Le détendeur D a été supprimé et une pompe supplémentaire a été installée sur la dérivation vers EV.

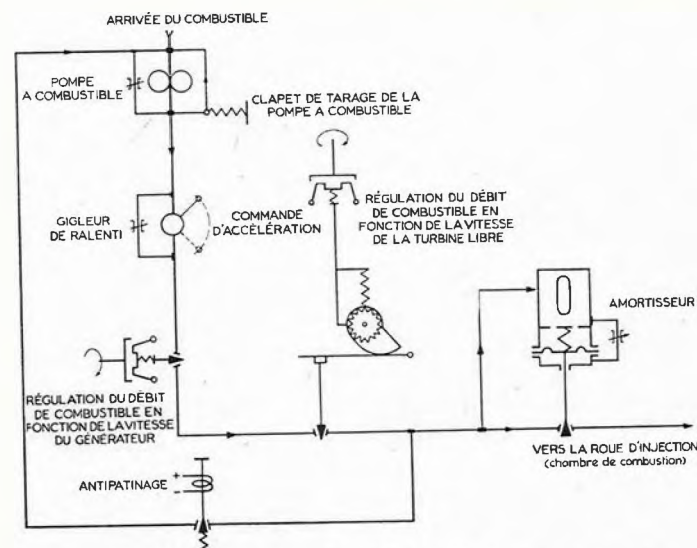


FIG. 10. — Schéma de principe de la régulation. Ce schéma donne le détail du régulateur R de la figure 2.

sion de 1 bar, celui de la pompe d'alimentation en P.S.P. est de 150 l/h sous pression de 5,8 bars et la micropompe alimentant les allumeurs torches porte la pression à 7 bars.

La puissance développée sur l'arbre de la turbine libre est réglée par l'admission de combustible au moyen d'un robinet doseur commandé par la manette d'accélération disposée sur le pupitre de commande avec contrôle de débit sous la dépendance de la vitesse de la turbine libre. Un second contrôle de débit de combustible sous la dépendance de la vitesse de rotation du générateur de gaz (compresseur et première turbine) assure l'alimentation progressive en combustible au cours de la mise en vitesse du générateur de gaz et indépendamment de la rapidité de manœuvre de la manette d'accélération ; ce contrôle agit pour limiter à 32 000 tr/mn la vitesse du générateur de gaz. De plus, un dispositif dénommé limiteur d'accélération régularise la pression du combustible à son admission dans la roue d'injection de la chambre de combustion.

Le lancement du générateur de gaz s'effectue au moyen d'un démarreur électrique alimenté sous 24 V et fonctionnant en génératrice pour le maintien en charge de la batterie, après le lancement.

Le générateur de gaz ayant atteint la gamme de ses vitesses de régime (20 000 à 32 000 tr/mn), la mise en action de la turbine libre s'effectue par la manœuvre de la manette d'accélération qui peut occuper en plus de la position d'arrêt et des positions de réglage de vitesse, une position intermédiaire, dite de préparation, qui correspond à la mise en service des pompes d'alimentation en combustible (gas-oil et P.S.P.) et à la mise en position d'alimentation de la roue d'injection en combustible P.S.P. de l'électro-vanne à trois voies EV (fig. 9) ; les tubulures d'alimentation des deux allumeurs-torches et de la roue d'injection sont alors gavées de combustible P.S.P. Après cette manœuvre, en actionnant un interrupteur placé sur le pupitre de commande, la micro-pompe MP est mise en action et alimente sous la pression de 7 bars deux allumeurs A en même temps que les électrodes sont mises sous tension, ce qui provoque l'inflammation du combustible ; le même interrupteur commande aussi l'ouverture progressive du robinet électrique RE qui règle l'admission de combustible à la roue d'injection. Après une durée de 5 s, la micro-pompe MP et les deux allumeurs A sont mis hors circuit, mais l'alimentation en combustible P.S.P. de la roue d'injection est maintenue jusqu'à ce que la pression dans la chambre de combustion atteigne une valeur suffisante pour permettre l'alimentation en gas-oil. Dès que cette pression est atteinte, l'électro-valve à trois voies EV se place en position d'alimentation en gas-oil de la roue d'injection et la turbine est alors en fonctionnement au ralenti avec alimentation au gas-oil. L'accélération peut alors être obtenue en portant la manette au-delà de la position de préparation au lancement P.

L'application de la turbine à gaz d'aviation à un véhicule terrestre pose impérativement le problème de l'insonorisation qui s'accompagne de l'incidence des dispositifs d'insonorisation sur le fonctionnement de la turbine. Les essais effectués au banc ont montré que le problème n'était pas aussi grave qu'on pouvait le redouter. En disposant des silencieux à l'aspiration et à l'échappement, on est parvenu à des abaisséments suffisants des niveaux de bruit sans introduire des pertes de charge donnant lieu à une diminution notable de puissance.

L'aspiration s'effectue par un caisson insonorisant avec persiennes anti-neige, grilles abat-son et filtres à très grande surface et très faible perte de charge. Pour l'échappement, la disposition reconnue la meilleure jusqu'à maintenant, combine un pot de détente avec un silencieux à absorption. La figure 11 montre l'ensemble de l'installation de la turbine à gaz et des silencieux d'aspiration et d'échappement.

Par ces dispositions, le niveau de bruit à l'intérieur du compartiment voyageurs à la vitesse de 160 km/h est de 70 dB turbine arrêtée et de 71 dB turbine en marche. Le niveau de bruit extérieur à 7,50 m latéralement est de 98 dB à 200 km/h turbine arrêtée et de 99 dB à 218 km/h turbine en marche, alors que sans insonorisation le niveau de bruit atteindrait 115 dB. A titre de comparaison le niveau de bruit d'un train classique à 140 km/h est de 99 dB.

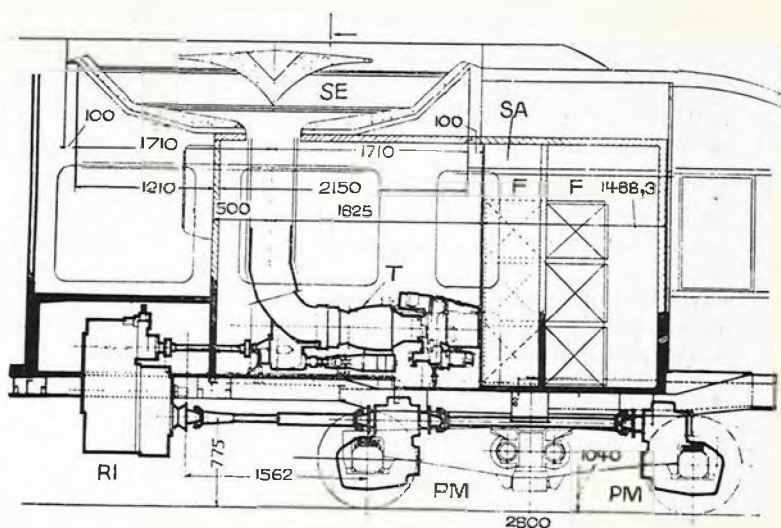


FIG. 11. — Installation de la turbine avec les silencieux à l'aspiration et à l'échappement, les filtres à air, le réducteur-inverseur et la transmission aux ponts-moteurs.

F, filtres à air ; — P, ponts moteurs ; — RI, réducteur-inverseur ; — SA, silencieux à l'aspiration ; — SE, silencieux à l'échappement ; — T, turbine.

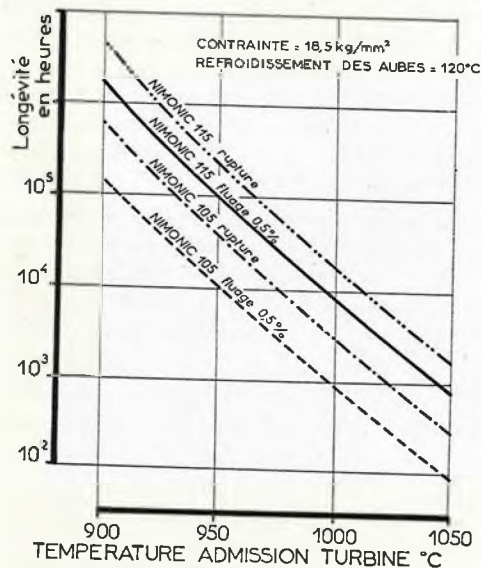


FIG. 12. — Variation de la longévité en fonction de la température à l'admission de la première turbine.

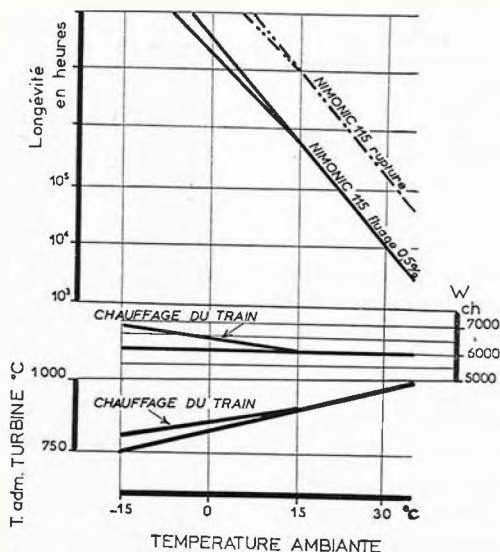


FIG. 13. — Variation de la longévité en fonction de la température ambiante (entrée du compresseur).

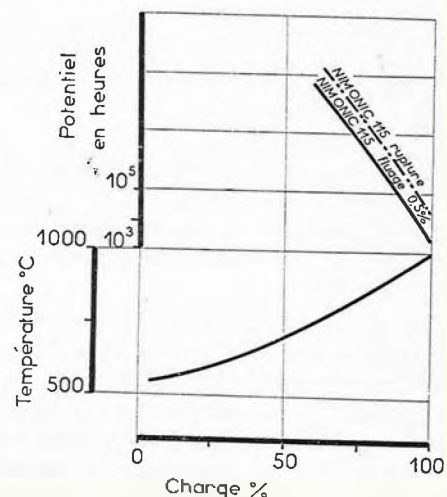


FIG. 14. — Variation de la température à l'entrée de la première turbine et de la longévité en fonction de la charge.

La longévité de la turbine à gaz en exploitation ferroviaire ne peut être vraiment déterminée que par des essais de durée. Cependant, dans la mesure où, en dehors de toute action corrosive, la longévité des turbines est liée au fluage des aubes, ce qui est le cas en pratique, elle s'accroît dans des proportions considérables lorsque la turbine est utilisée à un régime inférieur au régime maximal, ce qui est bien réalisé dans le cas de l'exploitation ferroviaire, puisque la puissance limite en service a été fixée à 810 kW au lieu de 1 100 kW en utilisation aéronautique. On peut donc espérer une longévité et une périodicité des révisions du même ordre que pour les autorails. Les courbes de la figure 12 qui ont été établies par Hispano-Suiza dans le cas d'un refroidissement par circulation d'air à travers l'aube creuse assurant un abaissement de la température du métal de 120 °C, montrent le comportement de l'alliage Nimonic utilisé pour la fabrication des aubes de turbine à gaz en fonction de la température des gaz ; elles font apparaître qu'un écart de 50 °C de la température des gaz multiplie par 10 la longévité des aubes. Les courbes de la figure 13 donnant la variation de la longévité en fonction de la température de l'air à l'admission font aussi apparaître l'aptitude d'une automotrice ou d'une locomotive à turbine à chauffer la rame. Enfin, sur le plan des variations de puissance et de charge comme tout moteur de traction, les turbines fonctionnent le plus souvent à charge partielle, la consommation spécifique se trouve augmentée mais aussi la longévité comme on le voit sur la figure 14.

En conclusion, il en résulte que sous réserve d'un fonctionnement dans un domaine de régime déterminé, la turbine à gaz d'aviation apparaît appropriée à la traction des éléments automoteurs.

Transmission

De l'arbre de sortie du réducteur de la turbine aux essieux, la transmission comporte (fig. 15) : un arbre d'accouplement à flectors, le réducteur-inverseur, un arbre à cardans attaquant le premier pont moteur et un second arbre à cardans liant les deux ponts moteurs.

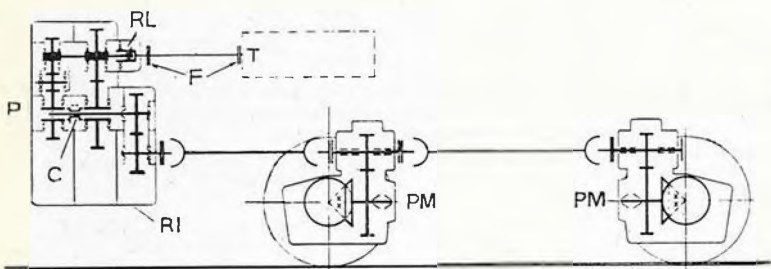


FIG. 15. — Schéma de la transmission.

C, crabot d'inversion ; — F, flectors ; — P, pignon parasite ; — PM, ponts moteurs ; — RI, réducteur-inverseur ; — RL, roue libre ; — T, turbine.

La vitesse maximale de l'arbre de sortie du réducteur de la turbine étant de 5 700 tr/mn et la plus grande vitesse admissible sur les arbres à cardans attaquant les ponts moteurs étant de 2 110 tr/mn, le réducteur-inverseur a un rapport de 2,7 ; il se compose :

- d'un arbre d'entrée solidaire en rotation de deux pignons et comportant en tête une roue libre permettant d'isoler la turbine des essieux lorsqu'elle n'est pas en traction ;

- d'un arbre intermédiaire solidaire en rotation d'un crabot double pouvant coulisser entre deux roues folles pour réaliser l'inversion de sens de marche : l'une des roues est directement en prise avec le premier pignon alors que l'autre est reliée au second pignon par l'intermédiaire d'un pignon parasite qui l'entraîne en sens inverse de la première.

Les ponts moteurs sont du type de ceux des éléments automoteurs de 330 kW, mais assez profondément modifiés pour les adapter à des essieux de diamètre légèrement plus grands et à la traversée de l'arbre d'entrée pour la liaison entre les deux ponts ; en outre, pour que le bogie soit aussi peut bridé que possible, le coulisement s'effectue sur les dentures de pont au lieu des cannelures d'arbres à cardans. Trois rapports de démultiplication correspondant à la vitesse maximale de rotation des arbres 2 110 tr/mn et aux vitesses de 202, 232 et 246 km/h ont été adoptés pour réaliser progressivement les essais en ligne à ces vitesses.

Bogies Y 214

Les bogies du type Y 214 dérivent de ceux du type Y 207, spécialement étudié pour la circulation à grande vitesse. D'une structure particulièrement simple (fig. 16), ils ont été créés essentiellement pour permettre le passage d'un arbre à cardans entre les deux essieux, ce que ne permet pas le bogie Y 207, la suppression du cadre de bogie et le plus grand empiètement permettant de disposer dans un même plan horizontal la traverse de charge et les barres de torsion de la suspension primaire et de dégager ainsi l'emplacement nécessaire pour l'arbre.

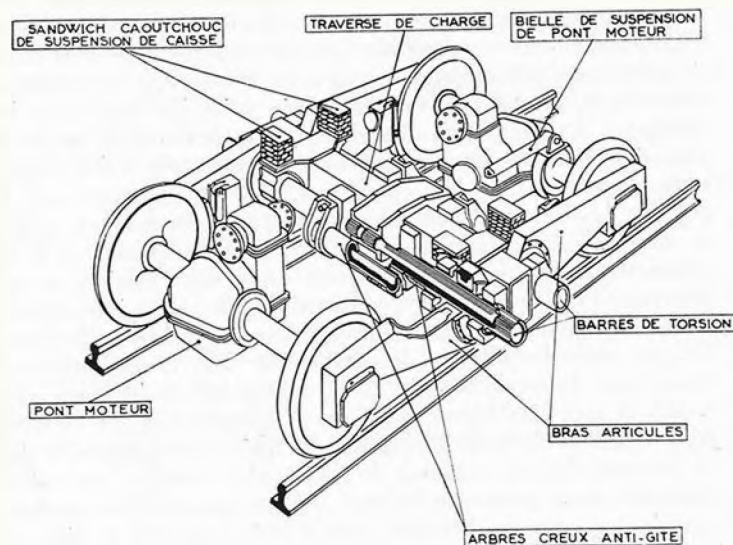


FIG. 16. — Bogie Y 214 à deux ponts-moteurs.

Selon les tendances actuelles, les flexibilités transversale et verticale de ce nouveau type de bogies sont importantes et les masses non suspendues sont faibles. Pour des masses totales de 3 830 kg en bogie porteur et de 4 900 kg en bogie moteur, les masses non suspendues verticalement sont respectivement de 2 160 kg et 3 240 kg, les masses non suspendues transversalement sont respectivement de 3 340 kg et 4 410 kg. La période propre d'oscillation verticale est de 1 s.

Les boîtes d'essieux à rouleaux sont liées aux bras de suspension par l'intermédiaire d'appuis en caoutchouc autorisant des déplacements latéraux de ± 10 mm. Les bras de suspension s'articulent, à leur extrémité opposée, sur la traverse de charge par l'intermédiaire de barres de torsion qui constituent la suspension primaire.

La liaison d'entraînement caisse-bogie est assurée par câble. Des amortisseurs à friction concourent à enrayer les mouvements du bogie dus à l'absence de quadrangulation des boîtes d'essieux.

La caisse repose sur la traverse de charge du bogie par l'intermédiaire d'appuis sandwich caoutchouc permettant le passage en courbe avec un débattement latéral de ± 60 mm.

Le freinage est assuré par des blocs P 60 à semelles Cobra ou Necto à raison d'un bloc par roue.

Cabines de conduites

Nous avons exposé ci-dessus les manœuvres de lancement et de réglage de la puissance délivrée par la turbine au moyen d'une manette d'accélération et d'un interrupteur, organes qui sont disposés sur le pupitre de commande mais sont entièrement distincts des organes de commande du moteur Diesel. La commande à distance du robinet RE (fig. 9) réglant l'admission du combustible s'effectue par le dispositif déjà adopté sur les locomotives à moteurs Diesel des séries BB 67 000 et A1A-A1A 68 000, qui est essentiellement constitué (fig. 17) d'un réservoir pneumatique A dont la pression peut varier de 0 à 3 bars sous l'influence de deux électro-valves B et C et

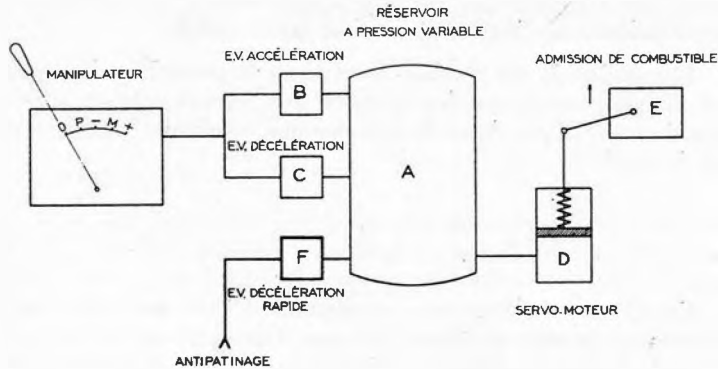


FIG. 17. — Schéma du dispositif de commande de l'admission du combustible, à partir du pupitre de conduite.

agit sur le servo-moteur D manœuvrant le robinet d'admission de combustible E. En outre une électro-valve de décélération rapide F commandée par le système de décel de patinage provoque une diminution immédiate de l'effort moteur en cas de patinage.

Le pupitre de commande ne diffère que très peu de celui des éléments automoteurs de 330 kW. Les manettes de commande d'accélération du moteur Diesel et de la turbine sont entièrement indépendantes mais montées sur le même axe (fig. 18).

Le pupitre présente constamment les indications suivantes :

- une lampe de signalisation générale indiquant sans distinction : une insuffisance de pression d'huile ; une survitesse de la turbine libre (au-dessus de 6 300 tr/mn) ; une tempé-



FIG. 18. — Le pupitre de conduite.

On remarque les deux manettes d'accélération coaxiales, l'une pour le moteur Diesel, l'autre pour la turbine.

rature trop élevée des gaz à l'entrée de la turbine libre. Chaque de ces défauts provoque l'arrêt de la turbine et les défauts sont gardés en mémoire par un système de relais et de lampes disposés à proximité du compartiment moteur et permettant d'identifier les défauts.

- Une lampe de signalisation de patinage.

- La température des gaz à l'entrée de la turbine libre, qui est mesurée par thermocouple et apparaît sur un indicateur à cadran. Cette indication est très importante car elle seule permet de connaître l'état de fonctionnement de la turbine au point de vue de la combustion. Au lancement, la température atteint environ 700 °C, en marche normale, elle doit être inférieure à 600 °C. Tout dépassement de la température de 750 °C au lancement ou de 600 °C en marche normale entraîne l'arrêt de la turbine ; une lampe de signalisation avertit le conducteur si la température en marche normale atteint 580 °C afin de lui permettre de diminuer l'injection avant l'arrêt automatique de la turbine par dépassement de la température de 600 °C.

Dans le cas de plusieurs lancements rapprochés, la température peut atteindre 750 °C, ce qui rend impossible tout nouveau lancement en raison du fonctionnement normal des sécurités. Pour cette raison, il est prescrit, au cas de lancement manqué, de procéder à la ventilation de la turbine par entraînement du générateur de gaz au moyen du démarreur électrique pendant une durée de 30 s au maximum. A cet effet, l'interrupteur qui commande la mise en marche de la micro-pompe à combustible P.S.P. et la mise en circuit des électrodes des allumeurs torches de la chambre de combustion comporte outre les positions « arrêt » et « marche », une troisième position « ventilation ».

La traction est assurée uniquement par le moteur Diesel au démarrage et aux faibles vitesses jusqu'à 50 km/h environ, par le moteur Diesel et la turbine aux vitesses supérieures. Le conducteur pouvant à tout instant régler à volonté les régimes de la turbine et du moteur Diesel aux valeurs appropriées à la vitesse désirée. La figure 19 donne les courbes effort-vitesse pour la traction par le moteur Diesel et par la turbine, ainsi que la résistance à l'avancement.

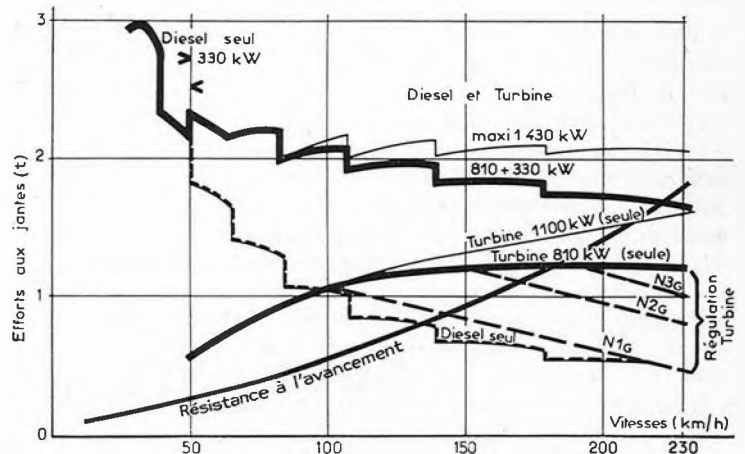


FIG. 19. — Courbes Effort-Vitesse et Résistance à l'avancement.

Protection contre l'incendie

La protection contre l'incendie est assurée suivant les dispositions appliquées sur les matériels aéronautiques, c'est-à-dire par déversement de fréon 12B1 (monobromomonochlorodifluorométhane C Br Cl F_2) au moyen de rampes munies de gicleurs. Le fréon 12B1, dont le point de congélation est de -160 °C et le point d'ébullition -4 °C, est stocké dans deux bouteilles de charge unitaire 15 kg, sous une pression de 17 bars à $+20$ °C, et une seule bouteille est, en principe, suffisante pour saturer le compartiment de la turbine. Ces bouteilles sont disposées à l'intérieur du caisson insonorisant.

La détection de l'incendie est assurée par 5 détecteurs bilames disposés aux points sensibles. Toute élévation anormale de température est signalée aux postes de conduite dans le compartiment moteur et le compartiment laboratoire par des lampes rouges clignotantes et provoque automatiquement l'arrêt de la turbine par fermeture de l'arrivée de combustible par les vannes coupe-feu VF1 et 2 (fig. 9).

Résultats des essais en ligne

Les résultats des essais en ligne ont été très satisfaisants.

Actuellement, un parcours total de 60 000 km a été accompli sans aucune défaillance à une vitesse commerciale de 135 km/h et 7 500 km à des vitesses comprises entre 180 et 238 km/h. La consommation aux vitesses de 200 à 238 km/h a été d'environ 1,6 l/km. La visite des organes mécaniques du réducteur-inverseur et des ponts-moteurs n'a révélé aucune altération des éléments de ces organes.

Les essais ont montré que le lancement de la turbine et sa mise en action s'effectuent sans difficulté à partir d'une vitesse de 40 km/h.

Le niveau des vibrations de la turbine à gaz est normal dans toute la plage du fonctionnement et l'insonorisation est satisfaisante tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Ces résultats intéressants ont conduit à entreprendre des essais destinés à déterminer l'endurance de la turbine à gaz, suivant un cycle comportant des parcours journaliers de 806 km soit Paris-Limoges et retour suivant l'horaire du train *Capitole*, avec un temps de fonctionnement journalier de la turbine d'environ 6 h. La consommation moyenne de la turbine étant de 1,4 à 1,6 l/km et la consommation pour l'élément turbine et moteur Diesel étant de 1,7 à 1,8 l/km. Ces chiffres relatifs aux vitesses de fonctionnement indiqués et dans les conditions de charge normale, soit 80 voyageurs, sont à comparer à la consommation au kilomètre des rames de grands parcours (RGP) ou Trans-Europ-Express (T.E.E.) de 825 ch à deux véhicules (autorail et remorque) qui est de 1 l/km à la vitesse moyenne de 120 km/h.

Les résultats de ces essais d'endurance seront d'ailleurs à considérer comme un minimum de ce qui pourra être obtenu en exploitation avec le nouveau type de turbine à gaz actuellement en cours de réalisation à partir du type Turmo III C utilisé pour les essais. Ce nouveau type désigné Turmo III F 3 diffèrera du Turmo III C par le renforcement des parois de la chambre de combustion et par le réducteur qui sera lui aussi de construction renforcée, enfin par l'introduction d'une butée variable sur la commande d'injection de combustible.

On doit remarquer que parallèlement à l'endurance de la turbine aux points de vue de la puissance et du couple développés sur l'arbre de sortie du réducteur et de la température de fonctionnement de la chambre de combustion, il faut considérer l'endurance aux sollicitations dynamiques exercées par la transmission mécanique, qui conduit à déterminer à partir de quelles valeurs de couple et de vitesse ces sollicitations deviennent excessives pour la construction de la turbine. Il restera d'ailleurs toujours possible d'adopter une transmission électrique qui offrirait en même temps l'avantage de résoudre par un freinage électrique le très difficile problème du freinage aux très grandes vitesses. L'emploi d'alternateur à grande vitesse de rotation et de redresseur au silicium permet d'envisager des transmissions électriques plus légères que les équipements classiques à génératrice à courant continu.

L'ensemble de ces résultats a confirmé la possibilité d'assurer en traction autonome des services aux mêmes vitesses qu'en traction électrique dans de très bonnes conditions d'économie et de confort.



Cet élément automoteur expérimental doit permettre non seulement la mise au point de types d'éléments automoteurs à turbine à gaz permettant de réaliser, en traction autonome, les vitesses déjà pratiquées en traction électrique en Allemagne fédérale, en France sur la ligne Paris-Toulouse (train *Capitole*), ainsi qu'aux Etats-Unis et au Japon sur la ligne du Tokaido, mais aussi de poursuivre les études sur diverses questions fondamentales telles que la stabilité aux grandes vitesses de bogies modernes équipés de ponts moteurs ainsi que les efforts exercés sur la voie par ces bogies, les contraintes sur la chaîne cinématique de la turbine aux essieux aux grandes vitesses, la détermination de la résistance aérodynamique à l'avancement, l'étude des phénomènes de perte d'adhérence, notamment lors des accélérations ou des freinages.

D'ores et déjà, les résultats obtenus ont conduit la S.N.C.F. à décider de passer très prochainement commande d'une ou deux rames automotrices prototypes composées de deux motrices équipées chacune de deux turbines et encadrant sept remorques, à suspension pendulaire afin d'améliorer le confort des voyageurs dans les courbes aux grandes vitesses. Ces éléments automoteurs sont en effet destinés à circuler sur les lignes non électrifiées, dont certaines, dans l'état actuel d'électrification du réseau de la S.N.C.F. sont des lignes à tracé comportant sur certaines sections de nombreuses courbes.

R. PAPAULT et Y. MACHEFERT-TASSIN.

OUVRAGES RÉCEMMENT PARUS

Annuaire du Groupement Intersyndical pour l'Équipement des Industries du Pétrole, du Gaz naturel et de la Pétrochimie (quatrième édition). — Un ouvrage (21 × 27 cm) de 500 pages édité par le Groupement Intersyndical pour l'Équipement des Industries du Pétrole, du Gaz naturel et de la Pétrochimie (G.E.P.), 10, avenue Hoche, Paris-8^e.

Cette nouvelle édition a été complétée et contient la composition du Conseil d'administration, la liste des membres, ainsi que celles des syndicats, entreprises et des marques, brevets et licences.

Les recherches sont considérablement facilitées par un index alphabétique des matériels, produits et services, et un clas-

sement des entreprises par matériels, produits et services.

Enfin, les pages documentaires, au nombre de 365, abondamment illustrées, donnent les renseignements généraux sur les très nombreux matériaux et matériels utilisés par les industries du pétrole, du gaz naturel et de la pétrochimie.

Journal de l'année. — Un volume (18 × 23,5 cm) de 400 pages avec de nombreuses figures. — Larousse, éditeur, 10, rue du Montparnasse, Paris — Prix : 54 F.

Cet ouvrage présente une synthèse de l'année du 1^{er} juillet 1966 au 30 juin 1967 en ne retenant que les faits essentiels, en classant et hiérarchisant les événements et

les idées qui ont agité le monde. Il est divisé en trois grandes sections : La vie politique en France et dans le monde. — La vie intellectuelle, les arts, les spectacles, les sciences, la vie religieuse. — La vie quotidienne et les problèmes de la vie moderne.

Dans la variété des sujets abordés citons particulièrement : les affaires, la législation, les prix, la bourse, les syndicats, les conflits internationaux, la vie à l'étranger, l'automobile, le cinéma, la télévision.

Conçu dans l'esprit encyclopédique qui caractérise les ouvrages Larousse, ce volume constituera, avec ceux qui le suivront chaque année dans le courant d'octobre, une véritable histoire contemporaine.