

RECHERCHES ACTUELLES DE LA S.N.C.F. EN MATIÈRE DE LOCOMOTIVES DE TYPES NOUVEAUX AINSI QUE DE MODIFICATIONS ou PERFECTIONNEMENTS D'ENGINS DE TYPES CLASSIQUES

Bien que des études détaillées aient déjà paru, soit dans la Revue générale, soit dans d'autres publications, sur plusieurs des machines dont il est question ci-après, nous pensons qu'elles n'enlèvent rien de son intérêt à l'exposé d'ensemble qu'ont rédigé MM. Chan et Tourneur, à la demande de M. Léauté, Professeur du cours de machines à l'Ecole Polytechnique, et aux conclusions qui le terminent.

I. — VUE GÉNÉRALE.

Depuis ces dernières années, la locomotive à vapeur a vu apparaître des machines de **types nouveaux** qui sont, tout au moins dans certains domaines, susceptibles de la concurrencer. Nous citerons :

A) Machines n'utilisant pas la vapeur :

- Locomotive à moteur Diesel, à transmission électrique ou mécanique;
- Locomotive à turbines à gaz.

B) Machines utilisant la vapeur :

- Locomotive à turbines à vapeur;
- Locomotive à chaudière spéciale (Velox, chaudière à tubes d'eau à 60 Hpz);
- Locomotive à petits moteurs alternatifs.

Ces types nouveaux, apparus assez récemment, sont encore, pour la plupart, en cours d'essais. De tous ces engins, seule la locomotive à moteur Diesel et trans-

mission électrique est entrée dans la pratique courante. Elle a d'ailleurs montré dans le domaine de la locomotive de petite puissance pour manœuvres, des avantages marqués par son économie, sa facilité de conduite et son service, qui peut être ininterrompu.

La **locomotive à vapeur à pistons** classique s'est, de son côté, considérablement améliorée depuis 1930, au point de vue du rendement et de la puissance, si bien qu'on dispose aujourd'hui d'engins développant 4 000 ch avec une consommation d'environ 0,7 kg de charbon par ch-h aux cylindres, correspondant à un rendement d'environ 10% à la jante. Un tel progrès est suffisant pour réaliser des machines remorquant dans de bonnes conditions des trains de voyageurs de 750 t ou des trains de marchandises de 1 400 t sur profil moyen (rampes de 5 mm par mètre); mais il reste à résoudre des problèmes d'entretien, afin d'obtenir, avec des machines très puissantes, des engins effectuant un service très régulier. C'est pourquoi il se pose

encore en ce moment, bien que son évolution soit déjà longue, d'importants problèmes pour la locomotive à vapeur du type classique. Ces problèmes ont été résolus en Amérique à l'aide de machines présentant une grande marge de robustesse, qui leur permet d'effectuer 150 000 à 200 000 km de parcours sans révision générale du mécanisme, alors que le parcours des machines européennes est d'environ 80 000 à 110 000 km par an (ces parcours correspondent à un an de service pour la machine à voyageurs et à 2 ans pour celle à marchandises). C'est dans cette même voie de machines très robustes que la S.N.C.F. poursuit ses efforts.

Pour bien situer l'intérêt qu'il y a à perfectionner la locomotive à vapeur classique, il faut rappeler que ce type constitue encore le fond principal du parc des locomotives des chemins de fer français. La consommation de charbon atteignait en 1939 environ 24 000 t par jour ou, en chiffres ronds, 9 millions de tonnes par an, chiffre à rapprocher des 45 millions de la production nationale et des 80 millions de la consommation totale française. Ces chiffres montrent que les locomotives à vapeur sont un des gros consommateurs de charbon

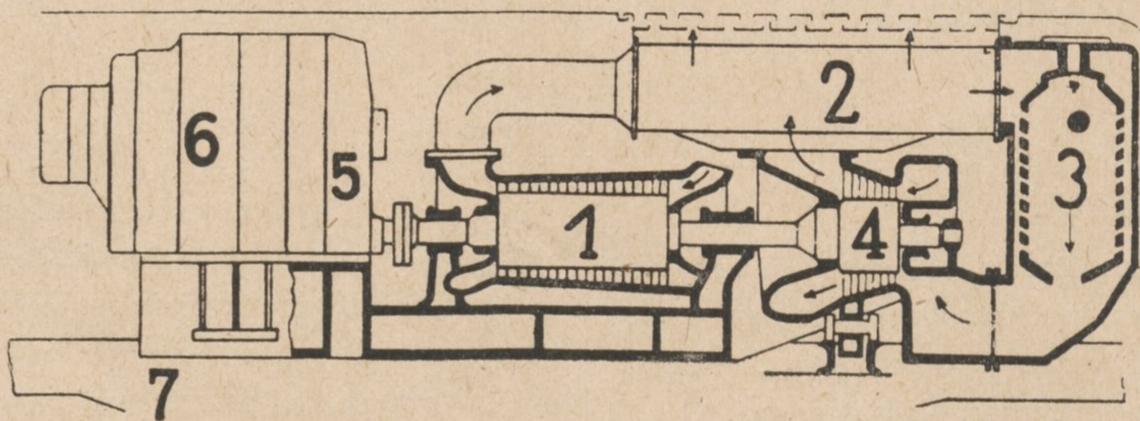
étendu aux locomotives, grâce à son haut rendement thermique (33 %, correspondant à une consommation de 162 grammes de fuel oil par ch-h, à la jante).

Les 2 premières locomotives Diesel à transmission électrique, dites « Diesel-électriques » ont été réalisées en France en 1937, sous forme de très grosses machines de 4 000 ch, en 2 unités de 2 000 ch chacune, sur châssis type 2-3-2, pour la remorque des trains rapides (1). Elles ont donné de bons résultats, mais la guerre, qui a arrêté notre approvisionnement de fuel oil, n'a pas permis de se rendre encore compte exactement de ce que deviennent à la longue les frais d'entretien. Néanmoins, les qualités propres à ce genre de machine permettent de la retenir pour un service comme celui du futur Méditerranée-Niger et la S.N.C.F. fait étudier pour ce but des locomotives Diesel spécialement adaptées au climat désertique.

Les machines de manœuvres de 600 ch sont, comme nous l'avons dit, entrées dans la pratique courante et on peut en voir en service à la gare de Lyon, à Paris.

Pour le service en France, les recherches actuelles de la S.N.C.F. visent à réaliser une locomotive Diesel de puissance moyenne, donnant environ 2 000 ch. Un

Fig. 1. — Locomotive à turbines à gaz.
Schéma du groupe générateur à turbine à gaz.
 1. Compresseur d'air axial. — 2. Réchauffeur d'air. — 3. Chambre de combustion. — 4. Turbine à gaz. —
 5. Transmission mécanique. — 6. Groupe générateur. — 7. Châssis.



du pays et qu'il y a intérêt à en améliorer le rendement, nonobstant le développement de la traction électrique (1).

Ceci posé, voici quelles sont les diverses recherches en cours.

II. — RECHERCHES EN COURS.

A) MACHINES N'UTILISANT PAS LA VAPEUR.

a) **Locomotives à moteur Diesel.** — Déjà très développé sur les autorails, l'emploi du Diesel s'est

élément important du prix de revient de ces locomotives est la transmission. On cherche à s'affranchir du coût élevé de la transmission électrique en essayant de réaliser, même pour cette puissance assez élevée, une transmission mécanique.

b) **Locomotive à turbines à gaz.** — Dans une telle machine, le combustible liquide (huile lourde) est brûlé dans une chambre de combustion et les gaz produits sont envoyés dans une turbine qu'ils font tourner. La température de combustion étant trop élevée (1 600° environ) pour l'envoi direct sur les aubes de la turbine

(1) Voir R.G.C.F. Notes de M. Godfernaux sur le charbon et les chemins de fer français. — Nos de Novembre 1927, p. 447 et Octobre 1932, p. 314.

(1) Voir R.G.C.F. du 1^{er} Juillet 1937 et du 1^{er} Mai 1938.

à gaz, on refroidit les gaz jusqu'à 550-600° par de l'air en excédent. L'air de combustion est fourni par une soufflerie à la pression de 4 à 5 kg/cm² (Voir Fig. 1).

L'apparition de la turbine à gaz ne remonte qu'à quelques années. Elle a été mise au point par la maison suisse Brown-Boveri et par son licencié français, la Compagnie Électro-Mécanique, et aussi par la Société Rateau.

La première locomotive à turbines à gaz est une machine de 2 200 ch, type 1-4-1, qui vient d'être mise en service par les Chemins de fer fédéraux Suisses; ceux-ci, bien que totalement électrifiés, se sont intéressés pour des raisons d'industrie nationale à cette production.

L'utilisation pratique de la turbine à gaz s'est heurtée pendant longtemps au mauvais rendement de la soufflerie, qui absorbait presque toute la puissance. Dans la machine ci-dessus, on a atteint en pleine charge le rendement de 16% (rapport de la puissance recueillie sur la jante à la chaleur introduite avec le combustible). Il est intéressant de noter que, pour la machine de 2 200 ch, la turbine développe la puissance énorme de 10 000 ch, que la soufflerie en absorbe 7 800 et qu'il reste ainsi seulement 2 200 ch pour la puissance utile à la jante.

Les avantages escomptés sont les suivants :

1° par rapport à la locomotive à vapeur, un meilleur rendement (16% au lieu de 11% pour la machine classique à mazout), et une absence de consommation d'eau, d'où un avantage pour les pays désertiques;

2° par rapport à la locomotive Diesel, l'emploi d'une huile de qualité inférieure; mais le rendement est inférieur et égal à environ la moitié (16% contre 28% pour le Diesel).

La S.N.C.F. vient de faire mettre à l'étude des locomotives à turbines à gaz qui pourraient éventuellement être utilisées sur le Méditerranée-Niger.

Ce que nous venons de dire concerne la machine à turbines à gaz normale. Il en existe une variante, qui est la machine Pescara, dans laquelle le générateur de gaz chauds n'est pas une chambre à combustion ordinaire, mais une sorte de moteur Diesel, dont on utilise les gaz d'échappement pour faire tourner la turbine à gaz. Son rendement serait très supérieur. Une locomotive du type Pescara est également à l'étude.

B) MACHINES UTILISANT LA VAPEUR.

a) **Locomotive à chaudière Velox.** — La S.N.C.F. a mis en service, assez récemment, en 1938, une loco-

motive d'express, type 230, à mécanisme ordinaire, dont la chaudière a été remplacée par une chaudière du type Velox à 20 Hpz (1). Rappelons que cette chaudière a une parenté très curieuse avec la turbine à gaz dont il a été question ci-dessus. C'est en cherchant, en effet, à refroidir la paroi de la chambre à combustion de sa turbine à gaz que la Société Brown-Boveri a constaté que l'eau de refroidissement s'échauffait au point de bouillir et qu'on obtenait un véritable générateur de vapeur. C'est ainsi qu'a été créée la chaudière Velox, dont le principe est le suivant : les gaz chauds s'échappant du foyer avec une grande vitesse (qui atteint 200 m par s) cèdent leurs calories aux parois vaporisatrices avec un rendement qui, grâce à la vitesse des gaz, atteint le chiffre extrêmement élevé de 90%. Sur la chaudière de locomotive de type classique, qui est déjà remarquable, le rendement est d'environ 70%. (Ces rendements sont le rapport entre les calories obtenues dans la vapeur et les calories du combustible). Un autre avantage de la chaudière Velox est qu'on met en pression une locomotive en 15 minutes, alors qu'il faut environ 4 h pour la locomotive de type normal. Cette rapidité est liée à la masse d'eau à échauffer, la chaudière Velox étant une chaudière à circulation forcée, utilisant 600 l d'eau, contre 8 000 l pour la machine ordinaire.

Il est impossible de donner ici la description, même schématique, de cette machine assez compliquée (2). Disons seulement que le résultat a été des plus remarquables, car on a obtenu à la vitesse de 120 km/h une économie de 37% sur les calories de combustible nécessaires par rapport à la machine classique à charbon. Il reste à vérifier — et cela est très important — que la chaudière Velox placée à bord d'une locomotive s'accommode bien d'une alimentation en eau brute, non distillée, simplement épurée au phosphate trisodique. C'est le point que la S.N.C.F. cherche à vérifier actuellement, mais faute de mazout, l'essai est présentement interrompu après environ 20 000 km de parcours. Si l'essai continue à être satisfaisant, on pourra, semble-t-il, en conclure qu'on possède avec la chaudière Velox, qui est susceptible de fonctionner à haute pression, une solution au problème de la chaudière de locomotive à haute pression, par exemple 60 Hpz. (Le timbre normal des locomotives est de 20 Hpz au maximum). Ce problème n'a pas encore reçu, pour l'instant, en France, de solution éprouvée.

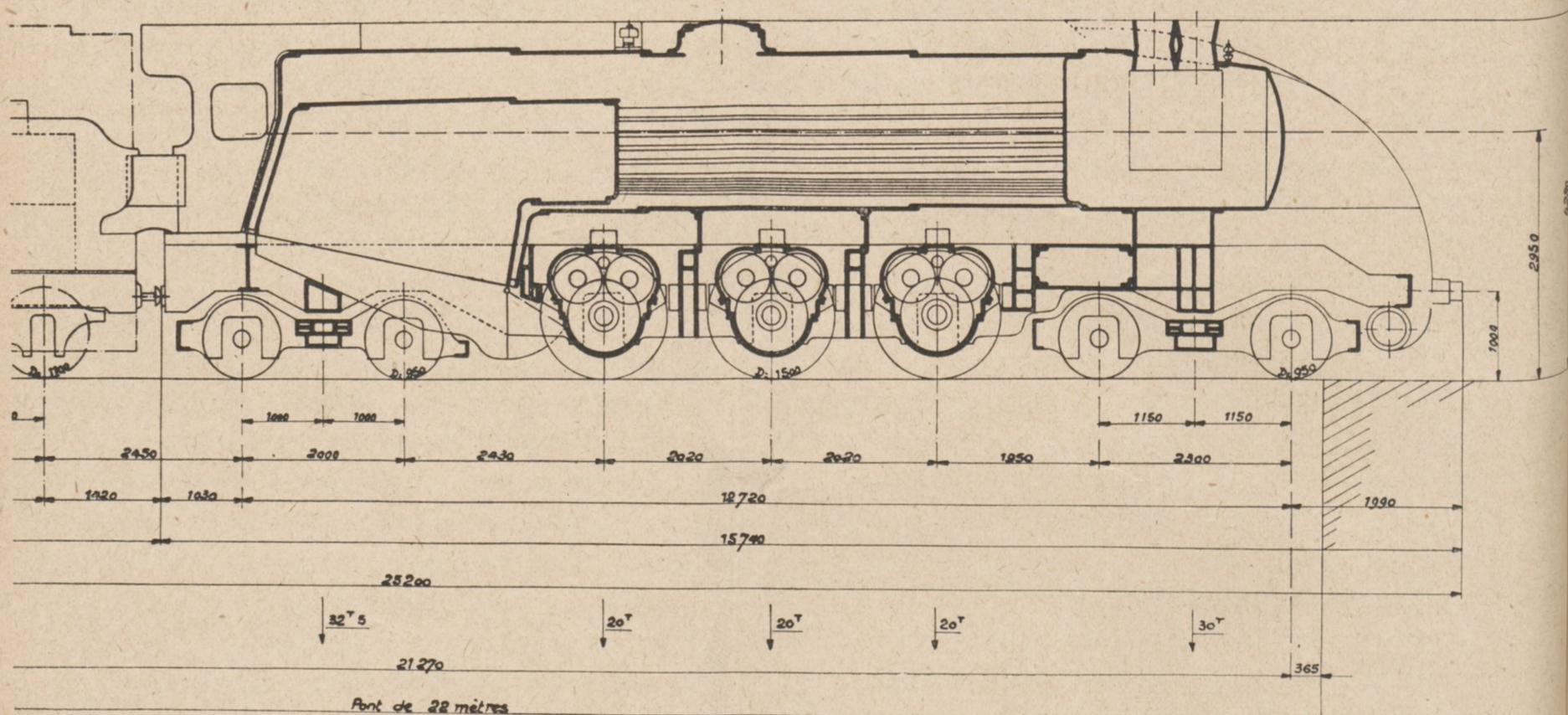
(1) Voir Génie Civil du 4 août 1934, du 14 septembre 1935 et du 8 juillet 1939 et R.G.C.F. du 1^{er} juin 1939.

(2) La description en a été donnée dans la R.G.C.F. du 1^{er} juin 1939 citée précédemment.

b) **Locomotive à turbines à vapeur.** — La première locomotive à turbines réalisée en France a vu le jour en 1939, sous forme d'une machine pour trains rapides, type 2-3-2, d'environ 3 000 ch à la jante ; construite par les Établissements Schneider au Creusot, elle est en cours de mise au point et constitue encore une des recherches présentes de la S.N.C.F. (Fig. 2).

La locomotive S.N.C.F. présentement en essai ne comporte plus de condensation. Ce qu'on cherche à obtenir avec cette machine, ce sont avant tout des avantages d'ordre mécanique pour les très grandes vitesses. La turbine est un organe qui « tourne rond ». Pour tourner tout à fait « rond », on est allé jusqu'à supprimer toutes les bielles d'accouplement et on a

Fig. 2. — Locomotive à turbines individuelles Schneider.
Schéma d'ensemble.



Pourquoi la turbine à vapeur, qui existe en Marine et en installations fixes depuis 40 ans a-t-elle tardé à être appliquée aux locomotives ? C'est à cause de son faible rendement aux faibles vitesses, qui s'adapte mal aux démarrages de la locomotive et à sa marche à allures très variées. Malgré cela et à cause de son rendement élevé à forte charge (la turbine à vapeur a un rendement de 25 %) on a cherché depuis 1920 à employer la turbine en y joignant la condensation qui, comme on le sait, abaisse le vide et permet à la turbine de réaliser une détente très poussée (la locomotive à pistons détend jusqu'à une pression absolue de 1 200 kg environ, soit 200 grammes au-dessus de la pression atmosphérique ; la locomotive à turbines est parvenue à détendre jusqu'à un vide de 80 %). Les locomotives à turbines essayées ainsi à l'étranger, notamment en Allemagne, en Suède et en Argentine, ont procuré une économie de charbon de 25 à 30 % par rapport aux locomotives à vapeur, mais on a rencontré des inconvénients dus à la complication des appareils auxiliaires.

réalisé une locomotive à turbines individuelles, chaque essieu ayant sa turbine reliée à l'essieu comme l'est le moteur électrique d'une locomotive électrique, c'est-à-dire avec les degrés de liberté voulus pour que l'essieu puisse osciller verticalement par rapport au châssis au passage des joints de rails.

Chaque turbine comporte des roues de marche AV et des roues de marche AR calées sur le même arbre et tourne à la vitesse très élevée de 10 000 tours, ce qui exige une démultiplication par engrenages égale à 20, les essieux tournant à 500 tours (Fig. 3).

La chaudière est du type classique, sauf que son timbre a été élevé de 20 à 25 Hpz.

Les premiers résultats, obtenus en 1941, sur le banc d'essais de Vitry, ont été les suivants : la consommation est d'environ 0,8 kg de charbon par ch-h à la jante et correspond à un rendement de 9 %, chiffres correspondants à ceux d'une bonne machine compound ordinaire, résultat auquel on s'attendait, puisqu'on avait renoncé à la condensation de la vapeur d'échap-

pement et aux grandes détentes, et que le nombre d'étages des turbines était réduit par la faible largeur de la locomotive. Au point de vue mécanique, la machine est extrêmement stable et sans vibrations. Il reste à l'éprouver en service, aux grandes vitesses et au service sans arrêts qui est celui qui convient le mieux à ce genre de machine.

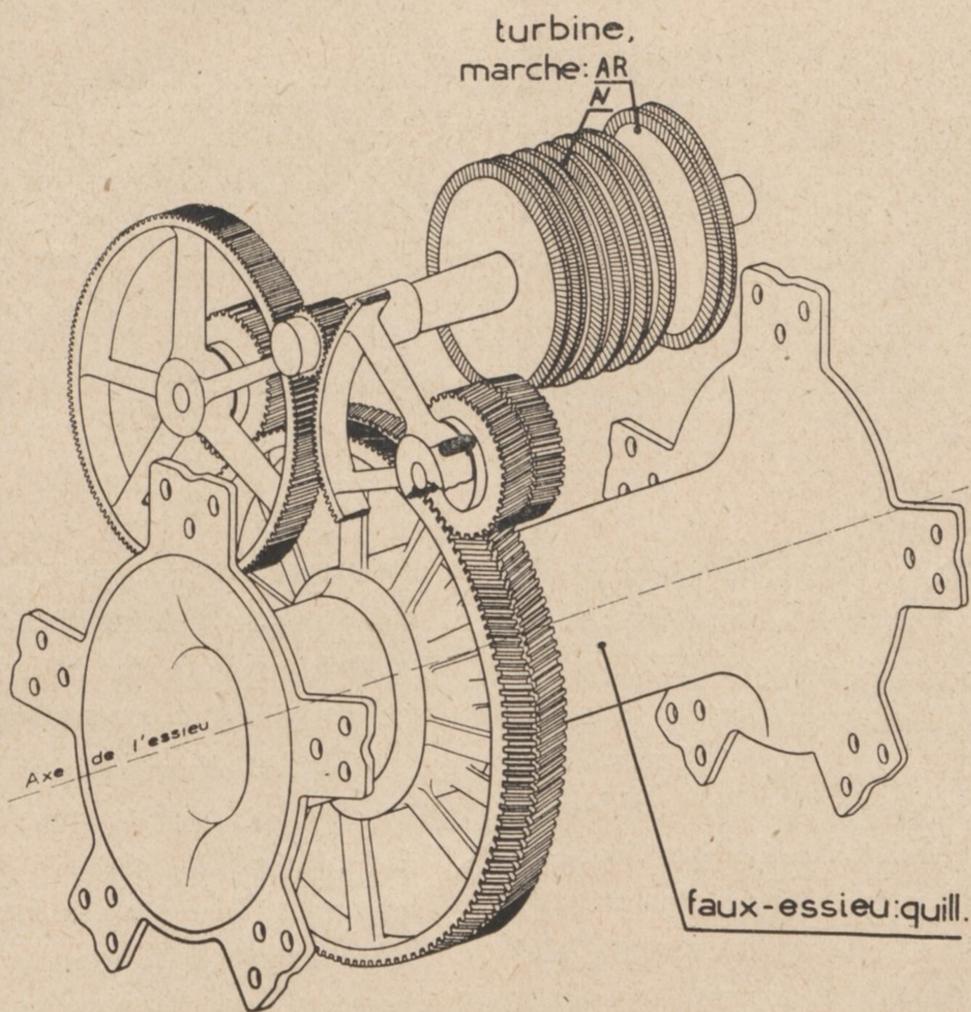
La S.N.C.F. n'a pas d'autres études en cours en matière de locomotives à turbines, mais si les circons-

C'est une machine type 2-6-2 à six essieux moteurs, à chaudière à 100 kg/cm², à vapeur surchauffée à 500°, actionnant 2 turbines à condensation, l'une à haute pression, l'autre à basse pression donnant en 2 unités 5 000 ch. L'économie serait de 40% par rapport à la locomotive ordinaire, le prix de la machine serait double.

c) **Locomotive à petits moteurs individuels.** — L'idée de fractionner la puissance de la locomotive

Fig. 3. — Locomotive à turbines individuelles Schneider.

Schéma montrant comment se présente une des turbines avec ses engrenages de réduction attaquant l'arbre creux ou quill qui entoure l'essieu (Sur le schéma, le stator de la turbine et tous les carters sont supposés enlevés).



tances s'y prêtaient, elle essaierait une autre solution comportant une seule turbine placée à l'avant et qui, quoique laissant subsister les bielles d'accouplement, serait plus simple et moins coûteuse que celle ci-dessus et permettrait, peut-être à la solution à turbine de prendre un certain développement.

A titre documentaire, il convient de signaler que les États-Unis ont cherché à réaliser une locomotive à turbines à vapeur présentant tous les perfectionnements possibles, sans égard à la dépense et cela dans un but, semble-t-il, de démonstration technique.

en autant de moteurs qu'il y a d'essieux accouplés est séduisante a priori, d'après l'exemple même des locomotives électriques où il y a un moteur par essieu et aussi parce qu'il y a dans les locomotives à vapeur classiques, un organe délicat, qui est l'essieu coudé à 2 manivelles placé à l'intérieur et qui reçoit la puissance des cylindres intérieurs (il y a en général 4 cylindres — 2 extérieurs et 2 intérieurs) et la transmet à toute la machine.

Nous venons de voir la solution de la commande individuelle réalisée par des turbines. Une autre

solution consiste à mettre de petits moteurs alternatifs. La S.N.C.F. achève actuellement de faire construire une telle machine type 2-3-2, pour rapides, de 3 000 ch. Chaque essieu est attaqué par engrenages par 2 petits moteurs de 500 ch à 3 cylindres chacun de 150 mm de diamètre et 255 mm de course à simple effet, tournant à 1 000 tours. Il n'y a pas de condensation et la vapeur s'échappe dans la cheminée à la manière ordinaire pour produire le tirage (Fig. 4).

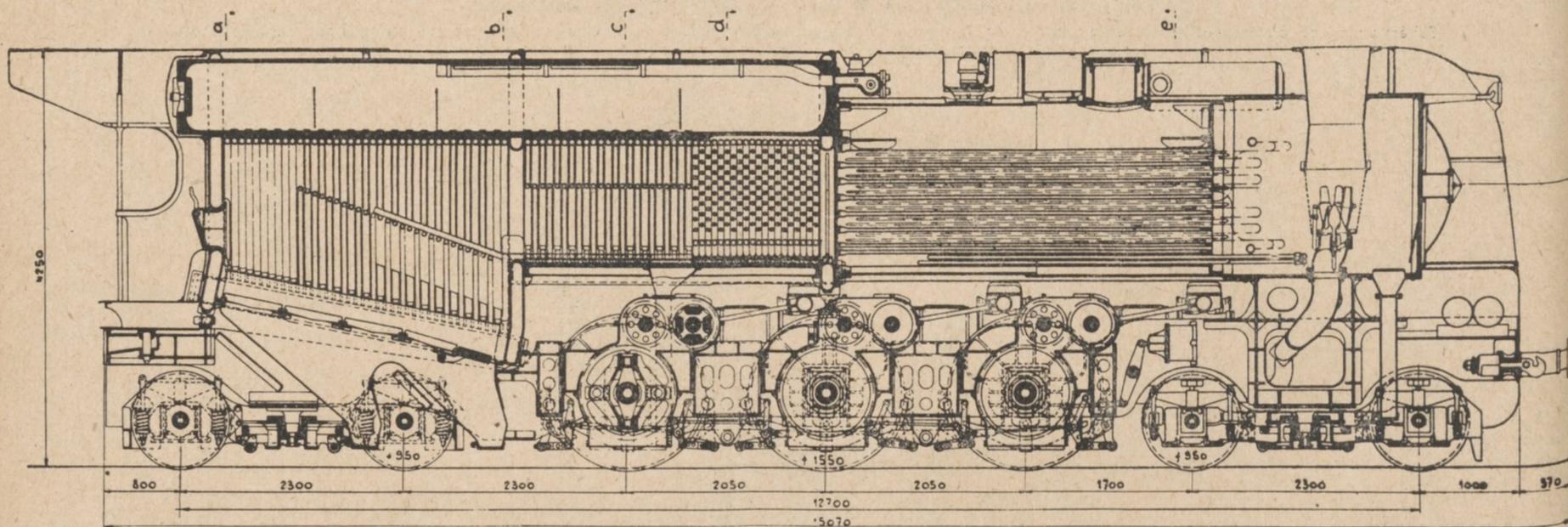
L'emploi de ces petits moteurs a été combiné avec

grâce à l'emploi de larges conduits et de distributeurs à grande section (notamment soupapes).

— emploi d'appareils de tirage ou « échappements » n'absorbant plus comme autrefois une part notable de la puissance (il suffit aujourd'hui d'une pression de 0,200 kg/cm² à 0,400 kg/cm² dans l'échappement pour produire la combustion du charbon sur la grille, alors qu'il fallait autrefois près de 1 kg/cm². On est arrivé, aux grandes puissances, à gagner 300 ch).

La courbe de la Fig. 5 résume l'effet de ces

Fig. 4. — Locomotive à petits moteurs et chaudière à haute pression (60 Hpz).
Schéma d'ensemble de la locomotive.



l'utilisation d'une chaudière à haute pression à 60 Hpz, du type à tubes d'eau (alors que la chaudière classique est comme on le sait à tubes de fumées). L'épuration de l'eau, qui est le problème difficile des chaudières tubulaires est réalisée ici par l'emploi d'une sorte de chaudière intermédiaire ou se réchauffe préalablement l'eau brute portée à la pression de 20 Hpz, c'est-à-dire à 210°, et où les boues peuvent se séparer. Cette chaudière intermédiaire alimente en outre les auxiliaires.

On escompte de cette machine des avantages d'ordre mécanique dus à l'emploi de moteurs individuels tournant en carter fermé et une certaine économie de combustible due à l'emploi de la haute pression. La machine entrera en service au milieu de 1942.

d) **Locomotives à vapeur de type classique.** — Les progrès récents de la locomotive à vapeur classique sont dus aux perfectionnements suivants :

- réchauffage de l'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement ;
- haute surchauffe (la vapeur saturée étant à 200° environ, on la surchauffe à 400°, limite imposée par la tenue des huiles de graissage) ;
- suppression des laminages et des pertes de charge

divers perfectionnements, qui ont augmenté pour une machine Pacific de rapides de type P.O., la puissance au crochet du tender de 1 450 à 2 800 ch et ont par ailleurs réduit la consommation de 30 %.

Au total, le rendement thermodynamique de la locomotive à vapeur, mesuré dans les cylindres, c'est-à-dire le rapport entre la puissance produite sur les pistons et l'énergie contenue dans la vapeur entrant dans les cylindres est passé de 11 à 15 %, soit un accroissement de plus de 35 %. Compte tenu du rendement de la chaudière et du mécanisme, le rendement à la jante est passé de 7 % à 10 %.

Tous ces perfectionnements ont été expérimentés et appliqués sur des machines anciennes existantes, dont la robustesse a été utilisée à la limite. Le problème étudié actuellement par la S.N.C.F. consiste à incorporer tous ces perfectionnements dans des machines neuves, où tous les organes soient bien adaptés à la puissance demandée (châssis plus rigide, roulements à rouleaux, chargeur mécanique, large grille de foyer passant de 4,25 m² à 5,50 m², etc...). On est conduit ainsi à des locomotives plus longues et un peu plus lourdes, à 2 essieux porteurs à l'arrière, répondant

Puissance au crochet en chevaux

à des types 2-3-2, 2-4-2 (pour les rapides) ou 1-4-2, 1-5-2 (pour les marchandises) au lieu des types 2-3-1, 2-4-1, etc..., ne possédant qu'un essieu porteur à l'arrière.

Une des premières locomotives de ces types nouveaux est la machine 232-S de la région Nord, dont les caractéristiques principales sont les suivantes : (Fig. 6) ⁽¹⁾.

Chaudière	}	timbre	20 Hpz
		surface de grille.....	5,17 m ²
Cylindres	}	2 cylindres haute pression de 455	
		(diamètre) × 700 mm (course).	
Cylindres	}	2 cylindres basse pression de 680	
		(diamètre) × 700 mm (course).	

Roues : diamètre 2 m.

Distribution : par soupapes.

Poids total : 127 tonnes.

Poids par essieu accouplé : 22 t (donnant pour 3 essieux un poids adhérent de 60 t).

Cette machine a remorqué des trains de 750 t en

rampe de 5 mm par mètre à la vitesse de 120 km/h, développant 3 000 ch au crochet du tender et 4 400 ch aux cylindres.

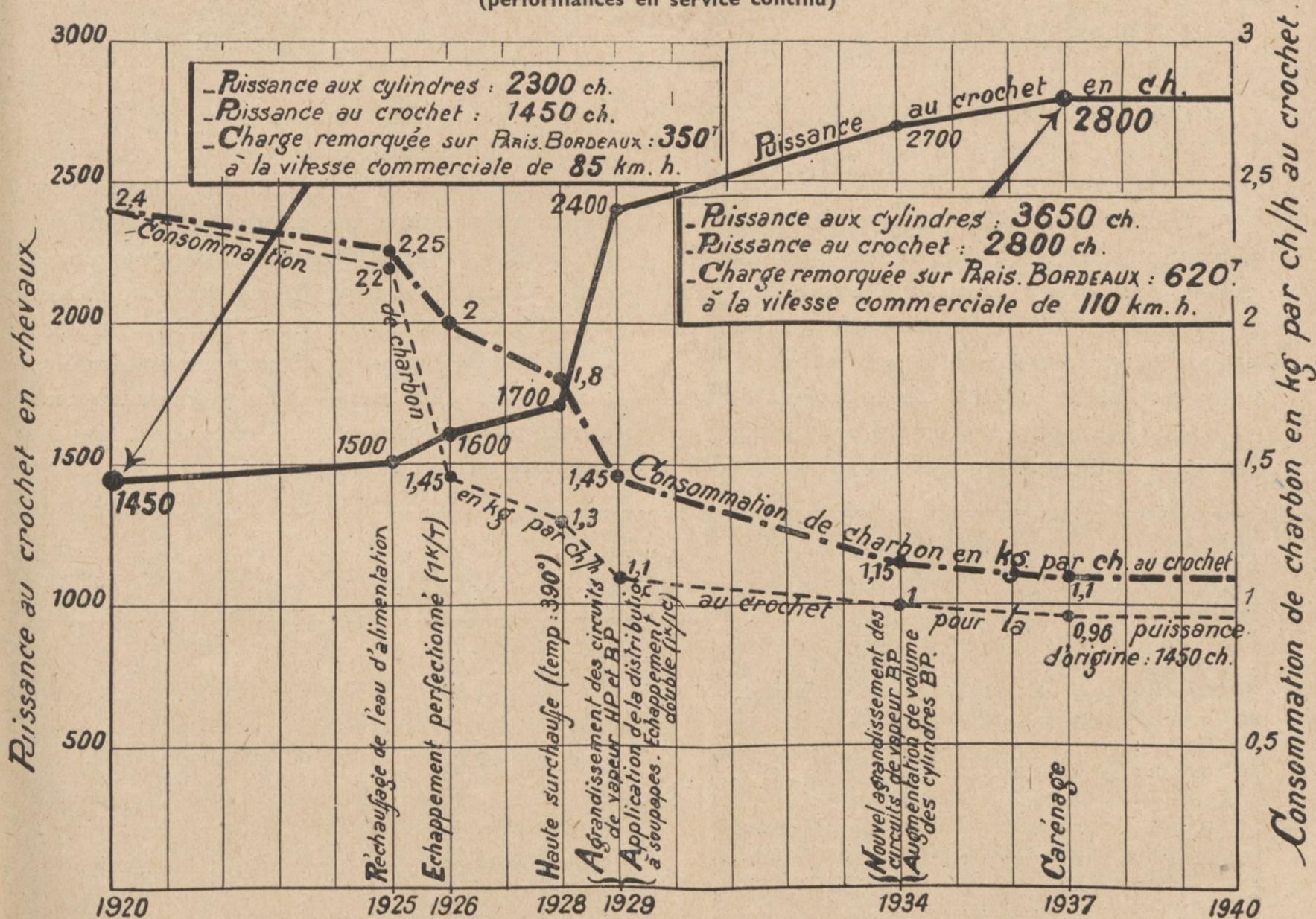
Indépendamment de l'étude des nouvelles machines très robustes, la S.N.C.F. poursuit les recherches suivantes :

— Réalisation d'une locomotive aérodynamique, étudiée spécialement pour la vitesse de 200 km/h, pour la remorque de rames légères ne dépassant pas 300 t. Cette machine sera du type 2-3-0.

— Réalisation d'une locomotive-tender légère pour voies secondaires, à accélérations rapides, de 1 500 ch environ.

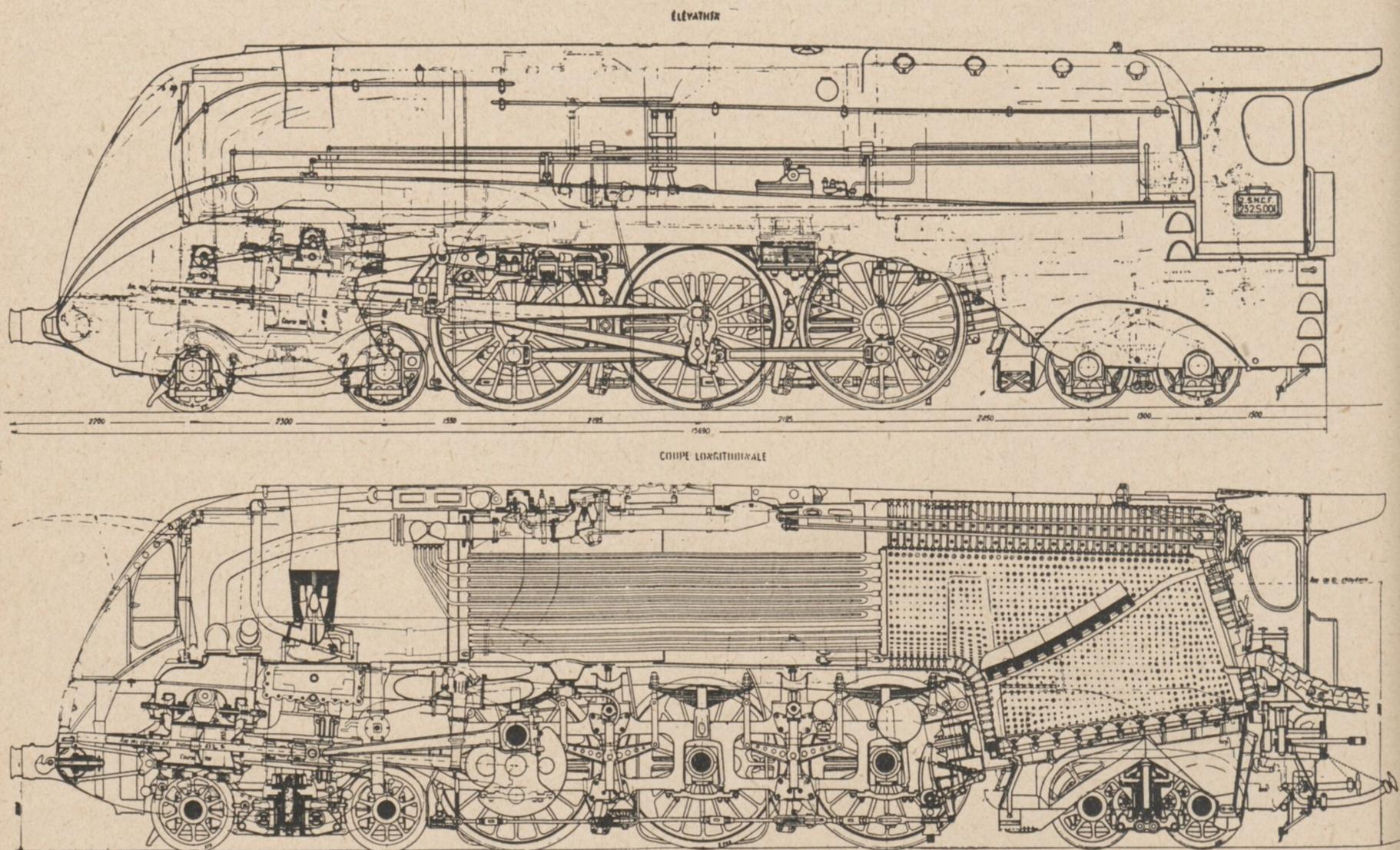
— Étude de problèmes théoriques sur la surchauffe, la resurchauffe de la vapeur entre les 2 étages de détente, et l'influence de chemises de vapeur réchauffant les parois des cylindres en vue de réduire les pertes de vapeur par « effet de paroi ». Ces études sont poursuivies sur une locomotive prototype type 1-6-0 à marchandises qui entrera en service en 1942.

Fig. 5. — Courbes montrant l'évolution de la locomotive à vapeur de type classique de 1925 à 1940. Variation de la puissance au crochet et de la consommation de charbon correspondant à la vitesse de 110 km/h. (performances en service continu)



⁽¹⁾ Voir R.G.C.F. de mai-juin 1940.

Fig. 6. — Locomotive récente de type classique. — Machine 232-S pour trains rapides.
Schéma d'ensemble.



C) COMPARAISON DU RENDEMENT DES ENGINES ET CONCLUSION.

Ayant parcouru les différents types de locomotives qui font présentement l'objet de recherches dans les chemins de fer, il ne sera peut-être pas sans intérêt de les comparer au point de vue du rendement (rapport entre l'énergie recueillie à la jante et les calories contenues dans le combustible). Le tableau ci-après en donne la comparaison par ordre de rendement thermique croissant.

Ce tableau doit surtout être considéré au point de vue théorique, car, pour donner une idée complète des prix de revient, il faudrait indiquer les dépenses d'amortissement, d'entretien, de graissage, etc..., qui sont assez élevées pour certains types comme ceux à Diesel. D'autre part, le prix des fuel présente, du fait de l'impôt, un caractère artificiel. Tout compte fait, la machine à vapeur classique conserve, grâce à sa simplicité de mécanisme — et malgré son rendement assez bas — une place prépondérante parmi tous les engins de traction thermique.

	RENDEMENT à la jante	CONSOMMATION de combustible par ch-h à la jante	PRIX du combustible par tonne en France, impôts compris en 1938	DÉPENSE de combustible correspondante par ch-h en 1938
		kg	fr.	fr.
Locomotive classique à charbon	10 %	0,800	240	0,19
Locomotive classique chauffée au mazout (fuel oil lourd).	11 %	0,490	467	0,23
Locomotive classique à chaudière Velox :				
1 ^{er} cas : fuel oil domestique	14 %	0,400	710	0,28
2 ^e cas : fuel oil moyen	13,2 %	0,440	600	0,26
Locomotive à turbines à gaz (fuel oil lourd).....	15 à 16 %	0,370	467	0,17
Locomotive à turbine à vapeur à condensation et transmission électrique de l'Union Pacific (fuel oil lourd)...	18 %	0,300	467	0,14
Locomotive Diesel électrique à moteur suralimenté (fuel domestique).....	28 %	0,200	710	0,14