

CHAPITRE X

ESSAIS DES LOCOMOTIVES

A. — EXPÉRIMENTATION DES LOCOMOTIVES

1^o But des essais.

Les essais de locomotives à vapeur ont pour objet :

- soit l'étude expérimentale des phénomènes thermiques, thermo-dynamiques et dynamiques dont une machine est le siège,
- soit la mise au point, dans un but de perfectionnement de dispositions ou d'appareils nouveaux,
- soit la recherche expérimentale des tracés, matières ou procédés les mieux appropriés à la construction d'organes ou de pièces de machines dont la tenue en service s'est révélée défectueuse.

Les résultats obtenus sont utiles :

- au Service de la Traction pour répartir judicieusement son parc de machines, de manière à assurer la remorque des trains avec le maximum d'économie compatible avec les conditions de charge et de vitesse imposées par le profil des lignes et les nécessités de l'exploitation,
- aux Ateliers d'entretien et aux grands Ateliers pour définir les meilleures techniques d'exécution des réparations et de construction des machines,
- aux bureaux d'études pour baser sur des données contrôlées par l'expérience, les études de prototypes nouveaux ou d'amélioration des machines existantes.

2^o Grandeurs à mesurer - Exécution des mesures.

Les phénomènes dont la locomotive est le siège, sont provoqués dans le but de transformer l'énergie calorifique contenue dans les combustibles en énergie mécanique utilisable pour la traction des trains (à remarquer qu'il faut utiliser un corps intermédiaire : l'eau). Le degré de perfection avec lequel s'opère cette transformation est mesuré par les valeurs des paramètres, qui en caractérisent les diverses phases dans les différents organes de la machine et peut s'exprimer par les valeurs des rendements, dont les définitions et expressions font l'objet du chapitre VII, tome III.

Tout essai de locomotive, est donc susceptible de comporter des mesures de pression, de températures, de consommation, d'efforts, de travail, de vitesse.

Pour présenter toute garantie d'exactitude, ces mesures exigent d'être faites :

- par un personnel soigneux et exercé,
- avec des appareils rigoureusement étalonnés et de sensibilité appropriée ou avec des méthodes réduisant au minimum la part d'arbitraire (cas des mesures de consommation d'eau et de combustible).

Les pressions sont lues sur des manomètres ou des déprimomètres. Il faut avoir soin de disposer les prises de pressions de telle sorte, que la pression statique cherchée ne soit pas faussée, le cas échéant, par la pression dynamique du fluide en mouvement. Les manomètres à tubes manométriques doivent être étalonnés à la température de l'enceinte où les mesures ont été faites, car un tube manométrique se déforme également sous l'influence de la température.

Les températures sont relevées au moyen de thermomètres ou de pyromètres.

Les consommations d'eau se mesurent directement par jaugeage du tender, en tenant compte des pertes pour amorçage des injecteurs et arrosage du combustible.

La consommation de combustible se détermine, la machine étant froide à l'origine, par pesée de la totalité du combustible chargé de laquelle on déduit les poids de combustible, utilisé pour la mise en pression de la machine et restant sur grille à la fin de l'essai, poids déterminés par une méthode dont l'exposé sortirait des limites de ce cours.

La vitesse se déduit du chronométrage du temps mis à parcourir une distance connue et repérée sur la voie (poteaux kilométriques). On ne peut déterminer ainsi que des vitesses moyennes. La précision du procédé est fonction du coup d'œil et des réflexes de l'observateur.

Le travail produit dans chaque cylindre est déterminé au moyen de relevés de diagrammes pris avec des appareils indicateurs, tels les appareils « Maïhak » dérivant de l'indicateur de Watt. On désigne ce travail sous le nom de *travail indiqué*. Quelques renseignements et le schéma des appareils indicateurs sont donnés au chapitre premier du tome III.

L'installation de ces appareils et les prises de diagrammes doivent être faites avec des soins particuliers, si l'on désire obtenir des renseignements exacts.

Pour mesurer les efforts, le travail et la puissance développés au crochet de traction du tender, on utilise des appareils spéciaux installés dans une voiture-dynamomètre dont on trouvera la description dans le numéro d'avril 1933 de la « Revue Générale des Chemins de Fer ». Ces appareils permettent un *enregistrement continu* des mesures sur une même bande de papier sur laquelle s'inscrivent également des repères du temps et des espaces parcourus ainsi que, par une courbe continue, les vitesses instantanées données par un vélocimètre. La reproduction d'une telle bande figure à la *figure 264*. Toutefois, nous noterons dès maintenant, qu'une voiture-dynamomètre possède aussi généralement des appareils *enregistreurs* de pression et de température reliés *électriquement* à des pyromètres et des manomètres placés sur la locomotive.

Nous verrons plus loin, que les installations du banc de Vitry mesurent les efforts, travail et puissance à la *jante*.

Quant à la puissance *indiquée*, on la déduit du travail indiqué déterminé au moyen des diagrammes d'indicateur si l'on connaît le nombre de coups de piston par minute correspondant.

Avant de poursuivre, nous insisterons sur la nécessité, au cours des relevés de consommation, de faire les mesures sur une chaudière en équilibre de fonctionnement pendant toute la durée de l'essai, c'est-à-dire avec un serrage de l'échappement qui doit rester fixe et avoir été choisis convenablement pour permettre de marcher à niveau d'eau constant. Ce n'est qu'à cette condition, que les consommations spécifiques obtenues, pourront être considérées comme exactes et utilisées, le cas échéant, pour la comparaison de machines entre elles. Il est également nécessaire, dans le cas d'essais comparatifs, que tout le charbon provienne d'une même fosse, ou tout au moins que les différentes variétés utilisées aient sensiblement le même *pouvoir calorifique* et se comporte au feu de la même manière, c'est-à-dire aient des *pouvoirs cokéfiant*s équivalents.

Les mesures des pouvoirs calorifiques et cokéfiantes sont faites en laboratoires sur des échantillons. On fait également déterminer en laboratoire le pouvoir calorifique d'échantillons de combustible restant sur grille en fin d'essai (partiellement brûlé) et de cendres.

Enfin, pour faciliter la comparaison des résultats d'essais d'une même machine, ou de machines différentes, on aura soin de n'exprimer la puissance au crochet du tender que par ses *valeurs ramenées en palier et à vitesse constante*.

En effet, la puissance développée par le moteur d'une machine se divise en deux parties qui sont absorbées :

1° *l'une par le train proprement dit* : puissance employée pour la remorque du train ou puissance mesurée au crochet de traction du tender.

2° *l'autre par la machine et le tender, qui se décompose elle-même en :*

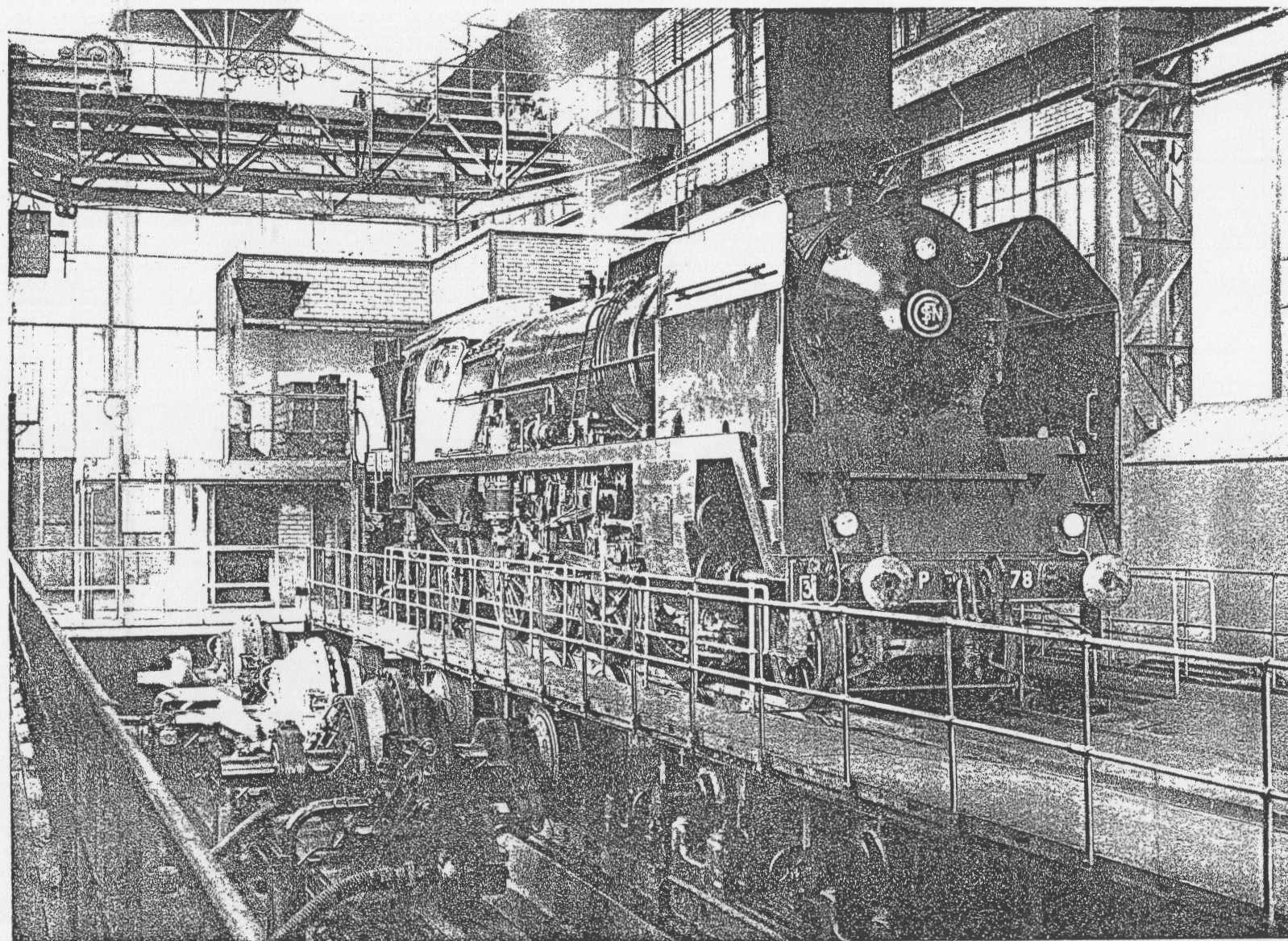
a) puissance employée pour vaincre les résistances intérieures et la résistance de l'air sur la locomotive et le tender;

b) puissance employée pour vaincre la résistance de la gravité si on est en rampe et pour accélérer la machine si on est en période d'accélération. Cette puissance peut être négative si on est en déclivité ou en décélération.

Cette dernière portion *b)* représente une puissance dont la machine pourrait disposer pour remorquer le train si on roulait en palier et à vitesse constante. Il est nécessaire de l'ajouter à la puissance au crochet de traction du 1°, afin de calculer la puissance au crochet dans des conditions bien définies qui soient toujours les mêmes et rendent les essais comparables. On obtient ainsi, en ajoutant *b)* au 1°, ce qu'on appelle « *la puissance de la machine au crochet du tender ramenée en palier à vitesse constante* ».

Pour calculer *b)* on se sert d'un pendule dit « d'inertie » qui s'incline sous l'action de la rampe et de l'accélération et dont l'inclinaison par rapport à sa position normale mesure précisément la résistance par *unité de poids* due à la rampe et à l'accélération. Pour avoir *b)*, il suffit de multiplier cette résistance par le poids de l'ensemble : locomotive + tender et par la vitesse.

Les mesures susceptibles d'être faites au cours d'essais de tenue en service, sont de simples mesures de cotes ou de poids destinées à chiffrer l'importance des usures constatées. Quant aux mesures relatives à la recherche des causes de ces usures, elles sont du domaine de laboratoires particulièrement agencés (pour ce qui concerne la qualité des métaux), ou nécessitent des méthodes spéciales dont l'exposé sort du cadre de ce cours.



BANC D'ESSAI DE VITRY

TRAIN 52 DU 7.12.42 . LOC. 141.P.1. CHARGE 789 TONNES.

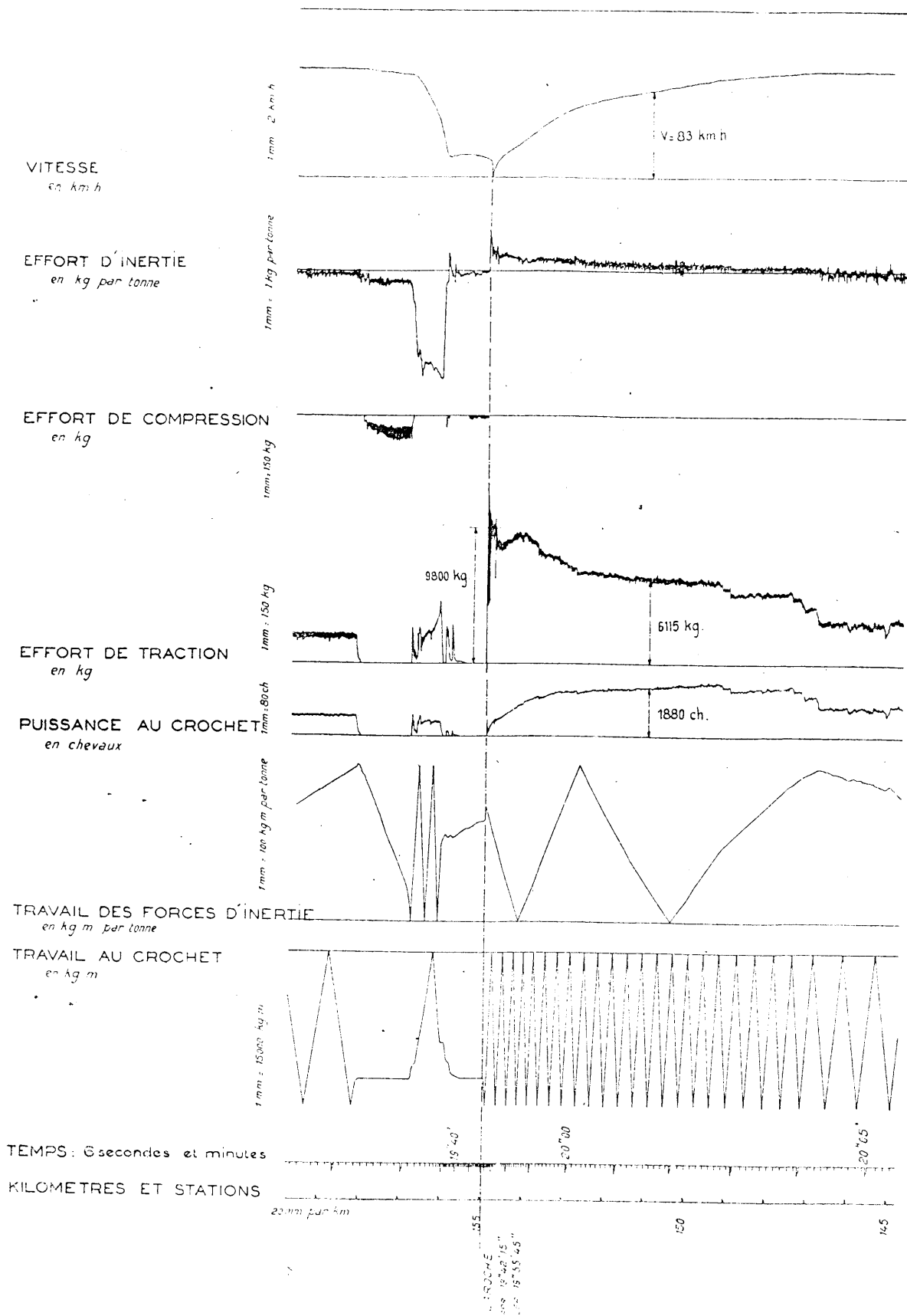


FIG. 264

3^o Modes d'exécution des essais.

Suivant leur objet et suivant le degré de précision que l'on désire obtenir dans les résultats, les essais sont faits dans des conditions très différentes :

- soit en ligne au cours de la remorque de trains du service courant ou spéciaux,
- soit en ligne avec l'emploi de machines-frein,
- soit sur un banc d'essai.

a) Essais en lignes à des trains du service courant ou spéciaux.

C'est en service courant, c'est-à-dire dans les conditions mêmes de leur fonctionnement que se font, en général, les essais de tenue en service des organes de machines. L'essai se borne à surveiller le comportement de l'organe et à relever périodiquement les usures, s'il y a lieu.

On fait également, en service courant, certains essais destinés à mettre rapidement en évidence les possibilités que peut offrir un type de machines donné pour assurer un service donné (facilités de démarrage et d'accélération, aptitude à donner des coups de collier, facilités de conduite, etc.).

Mais s'il est possible au cours de tels essais de faire des mesures exactes de travail et de puissance en intercalant une voiture dynamomètre entre la machine et le train, il sera, en général, extrêmement difficile, sinon impossible, de déterminer exactement les consommations d'eau et de combustible correspondant aux périodes de travail effectif. D'ailleurs, en tout état de cause, les valeurs des consommations spécifiques, c'est-à-dire par unité de puissance, qui pourraient en être déduites, ne pourraient être considérées comme des caractéristiques absolues de la machine, mais comme caractéristiques valables seulement pour les conditions de marche du train d'essais. Les consommations sont en effet essentiellement fonction des conditions de marche.

De plus, le domaine des essais de machines faits en service courant est limité en raison des nécessités du trafic, qui imposent à la fois les charges et les vitesses.

C'est pourquoi on est amené à compléter ces essais par des essais faits à des trains spéciaux dont on est maître de fixer les horaires et les charges.

Nous donnons *figure 265* une reproduction des courbes de vitesses, de puissances et d'efforts de traction au crochet du tender avec la représentation du profil sur lequel elles ont été relevées au moyen d'une voiture dynamomètre, pour un train spécial à marche accélérée et à tonnage élevé, remorqué par une machine 141 P sur le parcours Laroche-Dijon.

On a reproduit, à titre d'exemple, puisqu'elles ne correspondent pas à un travail moteur de la machine, les puissances et les efforts de traction enregistrés dans la descente de Blaisy à Dijon qui correspondent à des périodes de freinage pendant lesquelles l'effort de freinage sur le train a été supérieur à celui de la machine.

On remarquera les vitesses de passage à Blaisy (de l'ordre de 95 km/h) et la puissance maximum développée 2900 ch.

La comparaison de différents types de machines peut être faite également par essais en ligne, si elle ne doit être que *qualitative*. La comparaison des consommations sera, en général, extrêmement délicate, pour les raisons déjà exposées.

b) Essais en ligne avec emploi de machines-frein.

L'emploi de machines exerçant un effort de retenue, et appelées pour cette raison machines-frein, permet d'utiliser une méthode dans laquelle on maintient constants pendant l'essai les principaux facteurs déterminants de la puissance indiquée :

- vitesse,
- pression de la chaudière,
- ouverture du régulateur,
- degrés d'admission HP et BP,
- serrage de l'échappement.

Cette méthode est appelée méthode d'essai « à vitesse et puissance indiquée constantes ».

Des diagrammes de pression dans les cylindres, relevés au cours des essais permettent de déterminer et contrôler la puissance indiquée.

On enregistre l'effort et la puissance utile au crochet au moyen d'une voiture dynamomètre.

Les consommations d'eau et de charbon sont mesurées comme il a été indiqué plus haut.

L'essai se fait sur un parcours de profil aussi peu accidenté que possible et de longueur suffisante pour que les erreurs qui peuvent résulter de l'évaluation de la consommation de combustible au début et à la fin de l'essai soient pratiquement négligeables.

En raison des variations de profil de la ligne, il est nécessaire pour maintenir la vitesse constante de faire varier l'effort résistant au crochet de la machine d'essai. A cet effet, on utilise une ou plusieurs locomotives (machines-frein ou régulatrices) dont l'effort de retenue peut être réglé, soit par les

Train 51 à marche accélérée, charge 690 tonnes, remorqué le 23 Novembre 1942 par la locomotive 141.P.74 entre Laroche et Dijon

Courbes des vitesses, puissances et efforts de traction au crochet du tender

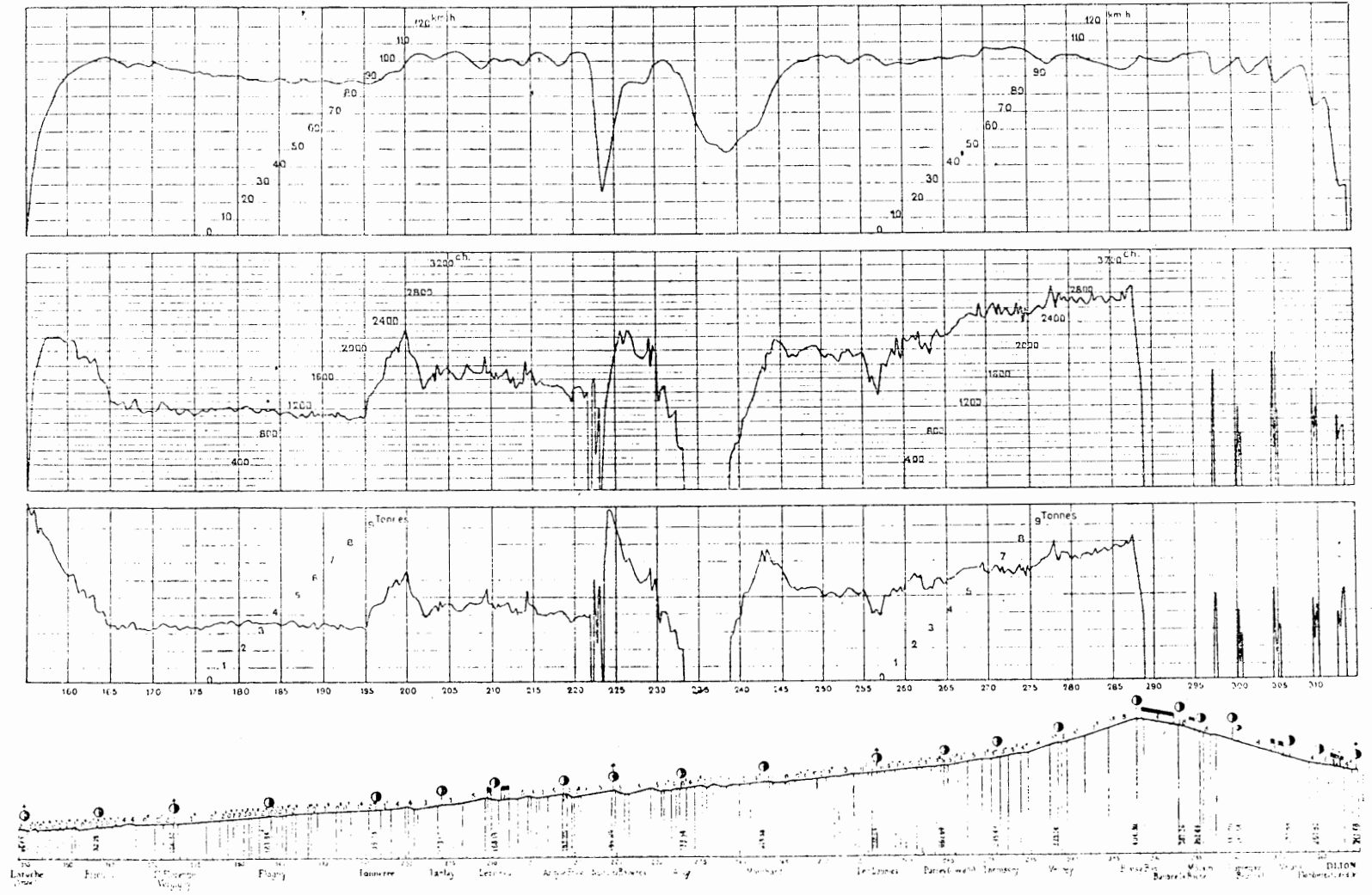


FIG. 265

manœuvres combinées du changement de marche et d'un régulateur spécial de contre-pression (cas des locomotives régulatrices marchant en contre-pression d'air), soit par la seule manœuvre du changement de marche (cas de locomotives régulatrices marchant en contre-vapeur).

Un train d'essai est donc composé comme suit :

- locomotive d'essai,
- voiture dynamomètre,
- une ou plusieurs locomotives régulatrices.

A la région Sud-Est, les locomotives-frein fonctionnent en compresseur d'air. Elles sont munies à cet effet des dispositions spéciales représentées *figure 266*.

Pour la marche en compresseur d'air, le régulateur de vapeur de la locomotive est fermé et les cylindres aspirant de l'air atmosphérique, le refoulent dans l'espace clos constitué par les tuyaux de prise de vapeur. La pression de refoulement est limitée par une soupape de sûreté spéciale. Une soupape de réglage de contre-pression, manœuvrable de l'abri, permet d'obtenir une détente réglable à l'atmosphère.

La méthode à vitesse et puissances indiquées constantes avec utilisation de locomotives-frein est celle qui répond le mieux aux conditions qu'exige l'étude générale de la locomotive à vapeur :

- faire l'essai dans des conditions aussi identiques que possible de celles de l'utilisation courante,
- pouvoir maintenir constants au cours d'un essai tous les paramètres dont dépendent les variables étudiées.

La méthode est plus particulièrement utilisée pour :

- déterminer les caractéristiques de puissance et de consommation de locomotives de type donné, en vue de l'établissement, pour le service courant, des tableaux de charge en fonction de la vitesse,
- déterminer les caractéristiques de puissance, de consommation, d'un type de locomotives avant et après certaines modifications susceptibles d'influer sur ces caractéristiques.

Les caractéristiques de puissance sont déterminées d'après les graphiques de la bande dynamométrique sur laquelle sont repérés les points kilométriques exacts du début et de la fin d'essai.

Le travail au crochet enregistré est tout d'abord ramené en travail en palier au crochet de la locomotive. A cet effet, on corrige le travail enregistré du travail positif ou négatif de la pesanteur, calculé sur la différence d'altitudes entre les points kilométriques de début et de fin d'essai et pour la locomotive et son tender avec charge évaluée à mi-parcours. S'il y a eu variation de vitesse entre l'origine et la fin de l'essai, il faut de plus, tenir compte de la variation d'énergie cinétique de la masse locomotive-tender.

L'effort moyen au crochet s'obtiendra en divisant le travail ainsi ramené en palier à vitesse constante par la longueur du parcours d'essai.

La puissance moyenne développée au crochet s'obtiendra en divisant ce même travail par le temps de parcours d'essai.

Les renseignements fournis par les essais sont traduits sous forme de graphiques, ce qui en facilite l'interprétation.

A la *figure 267* sont représentés trois graphiques usuels qui donnent :

- *figure 267 A*, les puissances au crochet, en palier, en fonction de la vitesse en km/h,
- *figure 267 B*, les consommations de charbon par cheval-heure au crochet en fonction de la puissance au crochet,
- *figure 267 C*, les consommations d'eau par cheval-heure au crochet en fonction de la puissance au crochet.

Ces graphiques ont été établis avec les résultats d'essais à vitesse et puissance constantes de la locomotive 141 C 7 du Sud-Est, obtenus avant et après les modifications de certains de ses organes :

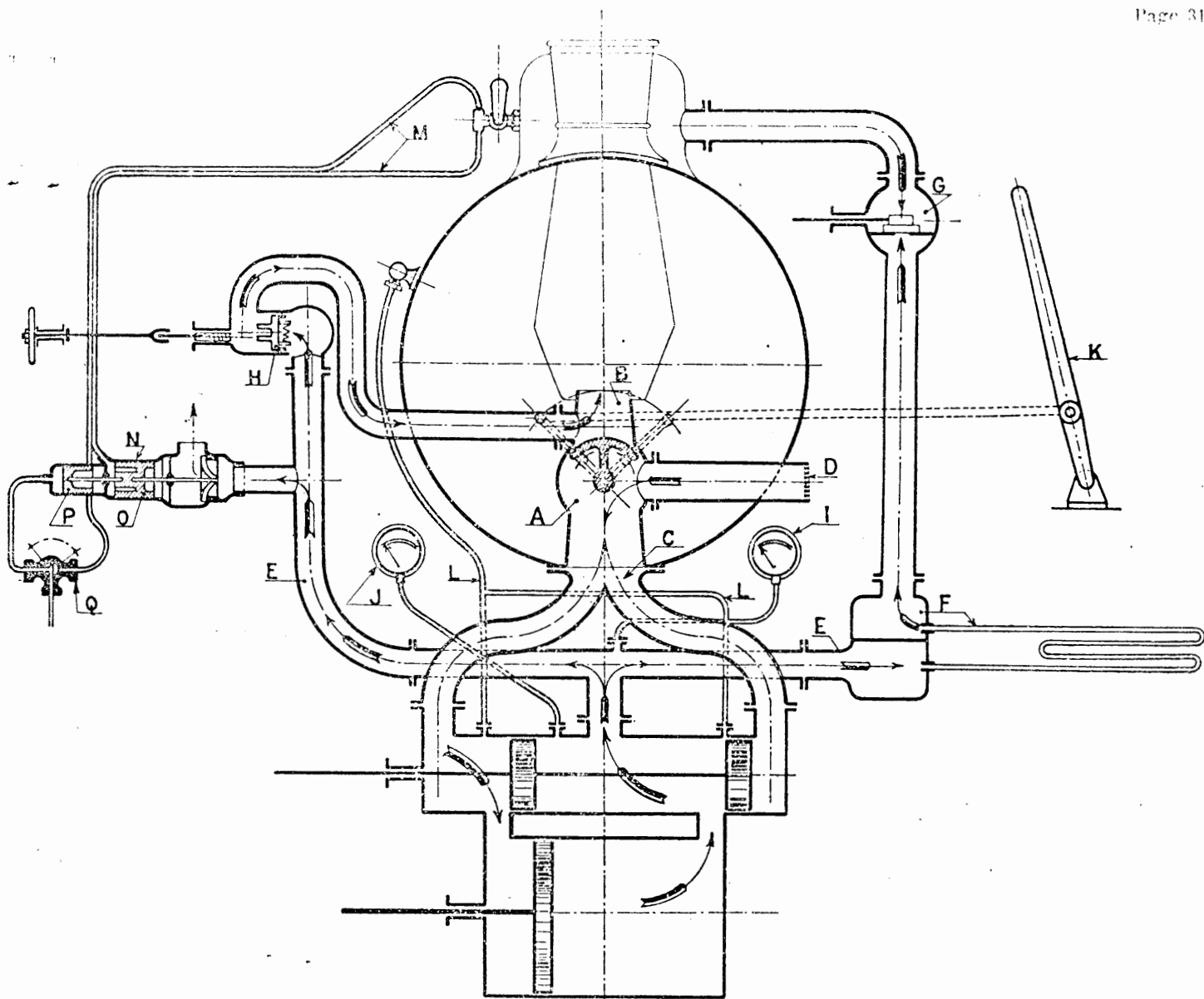
- application de tiroirs BP à double admission et double échappement,
- augmentation de la section de passage du régulateur,
- remplacement d'un surchauffeur Schmidt à 26 éléments par un surchauffeur Houlet à 28 éléments,
- remplacement de l'échappement à trèfle PLM par un échappement type Est à large section sans petticoat.

Les améliorations qui résultent de ces modifications apparaissent nettement :

- augmentation sensible de la puissance surtout aux crans et aux vitesses élevés (qui provient de la diminution des pertes de charge dans le circuit de vapeur grâce à l'augmentation des sections de passage dans le régulateur, le surchauffeur et les tiroirs BP et à la diminution de contre-pression due au nouvel échappement),
- diminution de la consommation d'eau (due à l'amélioration de la surchauffe),
- diminution de la consommation de combustible (liée à la diminution de consommation d'eau et vraisemblablement également à une meilleure combustion due au nouvel échappement).

Les résultats des mesures dynamométriques et des mesures de consommation, de pression, de températures, sont aussi utilisés pour faire le bilan thermique de l'essai : on calcule, à cet effet, à partir de ces résultats :

- la quantité totale d'énergie calorifique contenue dans le poids de combustible chargé, dans le foyer pendant l'essai,
- la quantité partielle de cette énergie utilisée effectivement dans le moteur,



LÉGENDE

- A. Robinet à 3 voies monté sur la colonne d'échappement.
 B. Tuyère d'échappement.
 C. Culotte.
 D. Tuyau d'aspiration d'air avec crépine.
 E. Tuyau d'admission de vapeur aux cylindres.
 F. Surchauffeur.
 G. Régulateur de prise de vapeur.
 H. Soupape de réglage de la contre-pression.
 I. Pyromètre habituel monté sur le tuyau d'admission.
 J. Manomètre habituel des boîtes à vapeur.
 K. Levier de manœuvre du robinet A.
 L. Tuyau d'injection d'eau.
 M. Tuyau de prise de pression de la soupape de sûreté compensée.
 N. Soupape de sûreté compensée.
 O. Piston d'équilibrage de la soupape de sûreté compensée.
 P. Piston de blocage de la soupape de sûreté compensée.
 Q. Robinet à 3 voies actionné par la manœuvre du robinet A.

FIG. 266

LOCOMOTIVE 141.C.7 SUD-EST

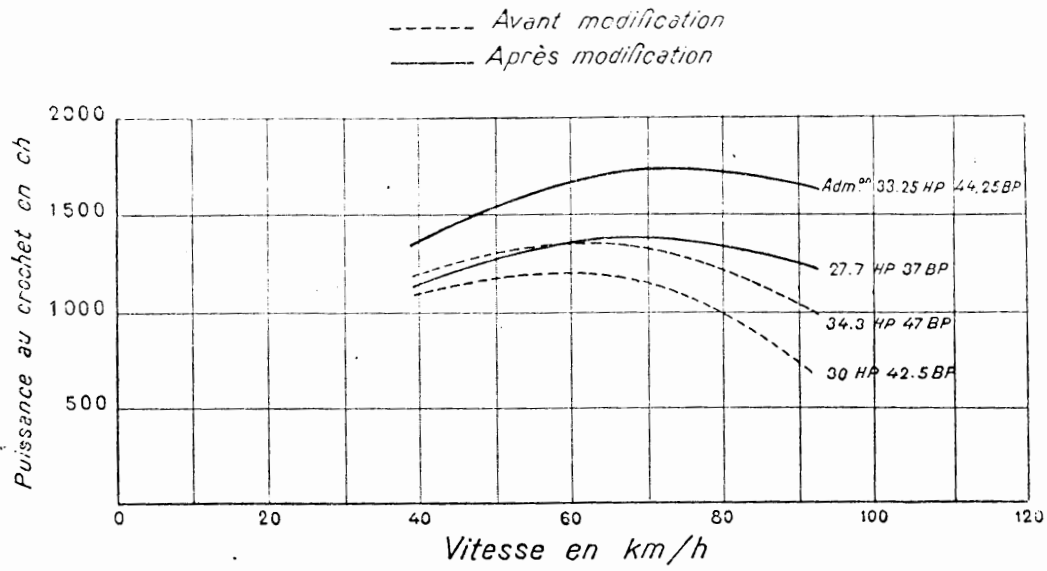


FIG. 267 A

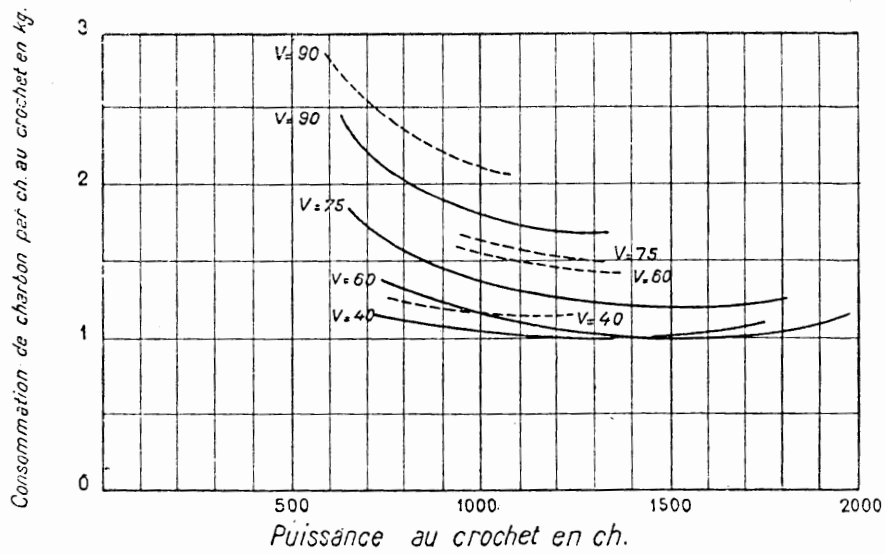


FIG. 267 B

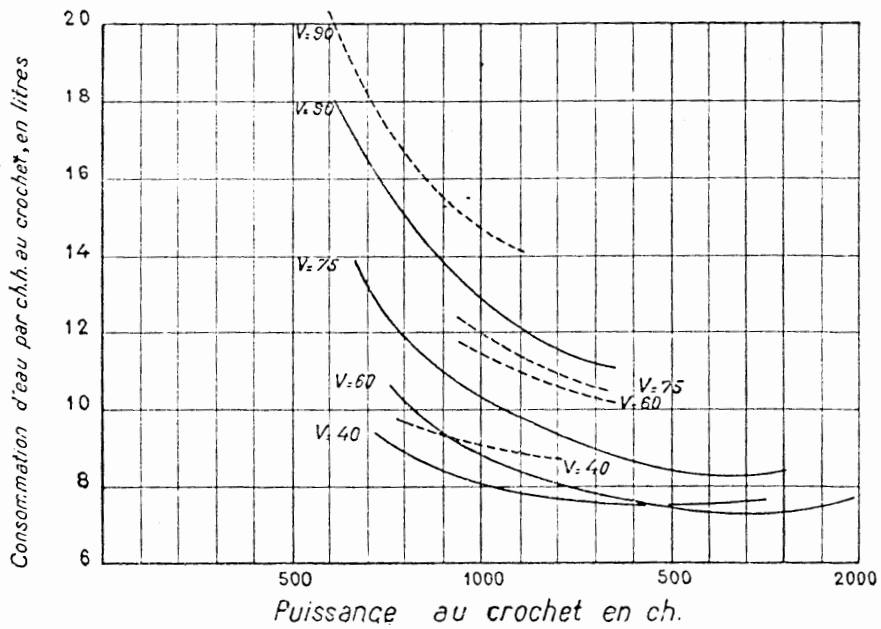


FIG. 267 C

Bilan thermique d'une chaudière de locomotive

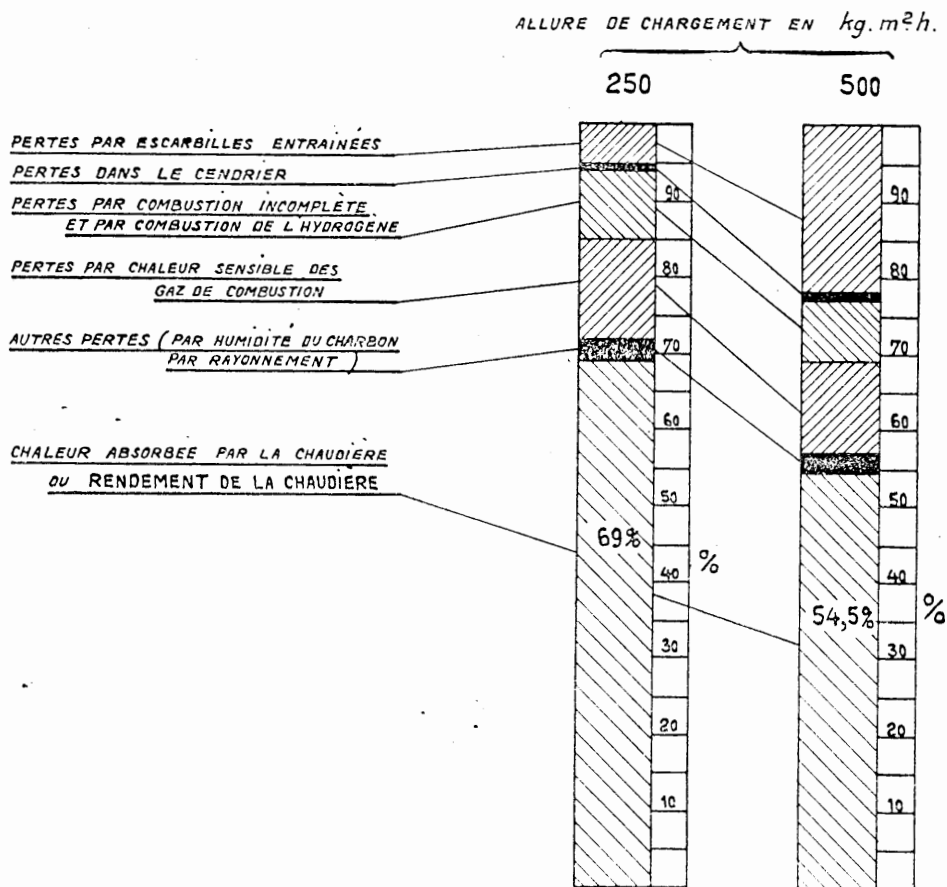
LOCOMOTIVE 140.A.9 NORD.

SURFACE DE GRILLE : 3,22 m²

CHARGEMENT A MAIN .

COMBUSTIBLE : 10% Aniche , 90% menu gras.

POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR : 7500 C.



*Ce très faible rendement
à 500 kg. d'allure de charge
est dû à la forte proportion
de menu.*

FIG. 268

— les quantités partielles perdues dans les résidus de la combustion, dans les gaz ou les vapeurs d'échappement et à l'extérieur par rayonnement et conductibilité.

Ces quantités s'expriment en calories. La *figure 268* donne un exemple de bilan thermique de locomotive.

En exprimant également en calories les puissances indiquées et au crochet de traction, il est facile de calculer les divers rendements de chaudière, du moteur et global dont les définitions sont données tome III, chapitre VII.

D'une manière générale, le rendement d'un organe quelconque peut être défini par le rapport de la quantité de calories recueillies à la sortie de cet organe à la quantité de calories fournies à son entrée. S'il est possible de faire des mesures pour déterminer ces quantités, on connaîtra le rendement. Le degré de perfection d'un organe sera d'autant plus grand que la valeur de son rendement sera voisine de 1.

La connaissance des rendements des divers organes d'une machine permet de fixer ceux d'entre eux sur lesquels il y a intérêt à porter les efforts d'amélioration. La *figure 269* donne un exemple de bilan de l'utilisation des calories de la vapeur.

c) Station d'essais de Vitry.

Les résultats des essais en ligne peuvent être faussés, malgré toutes les précautions prises, par des causes très diverses : variations de l'état atmosphérique (vent, rail glissant), arrêts imprévus dus à des signaux fermés, irrégularités du profil, difficultés de faire certaines mesures en plein air.

En outre, certains essais concernant le comportement des organes en mouvement de la locomotive (essais sur les vibrations de pièces, en particulier), n'ont jamais pu être entrepris sur les voies et seraient intéressants à exécuter aux vitesses normales et même à des vitesses élevées (140 à 150 km/h) que l'on ne peut réaliser sur la ligne.

C'est pourquoi les réseaux de chemins de fer français ont construit en 1933 à Vitry-sur-Seine une station d'essai dont le principe est le suivant :

Les essieux moteurs de locomotive à essayer sont déposés sur des rouleaux freinés par des freins et la locomotive est attachée à un point fixe (voir le schéma de principe et la coupe transversale du banc à la *figure 270*).

Les roues de la locomotive actionnées par les pistons entraînent les rouleaux par simple adhérence.

Du fait que les rouleaux sont freinés, ils opposent une résistance; la locomotive prend point d'appui sur eux, comme elle prend, en marche normale, appui sur les rails, et exerce ainsi un effort de traction sur la barre la reliant au point fixe.

Un dynamomètre interposé entre cette barre et ce point fixe mesure l'effort de traction qui est l'effort de traction « à la jante » des roues motrices.

On mesure la vitesse circonférentielle des roues de la locomotive et par intégration de l'effort de traction par rapport au chemin fictivement parcouru, on obtient le travail à la jante, et de là la puissance à la jante.

Pour subir son essai, la machine entre au-dessus de la fosse en roulant par les boudins de ses roues sur deux ornieres longitudinales; ces ornieres font partie d'une plate-forme mobile dans le sens vertical. Les rouleaux peuvent se déplacer au moyen d'une crémaillère le long de deux bancs parallèles à la voie; ils sont amenés très exactement au-dessous de l'axe de chaque essieu et à ce moment, la plate-forme est abaissée : la machine vient reposer par ses bandages sur les rouleaux.

Les rouleaux placés sous les essieux moteurs sont accouplés à des freins Froude : ce sont des turbines à eau dont on peut à volonté régler la résistance pour correspondre aux efforts de la traction de la locomotive.

Tous les appareils enregistreurs, analogues à ceux des voitures-dynamomètres, sont renfermés dans un local spécial d'où l'on peut facilement diriger le réglage des freins et donner des ordres au mécanicien.

Remarquons qu'au banc les conditions de refroidissement des organes, ainsi que les conditions de tirage diffèrent de celles de la ligne. On devra en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

L'essai sur le banc d'essais ne permet de mesurer la puissance qu'à la jante des roues. La puissance à la jante est différente de la puissance au crochet que l'on mesure en ligne. La puissance au crochet est la différence entre la puissance indiquée et la puissance nécessaire pour vaincre :

- la résistance des mécanismes moteurs,
- la résistance des essieux porteurs : locomotive + tender,
- la résistance à l'avancement (résistance de l'air),

tandis que la puissance à la jante est la différence entre la puissance indiquée et la seule puissance nécessaire pour vaincre la résistance des mécanismes moteurs.

La puissance à la jante au banc est donc supérieure à la puissance au crochet en ligne.

Il n'y a ainsi qu'au banc que l'on puisse déterminer le « rendement » du mécanisme moteur qui a pour expression le rapport entre la puissance développée à la jante des roues motrices et la puissance indiquée. Ce rendement qu'on appelle aussi « rendement organique » peut avoisiner 95 %.

Enfin le banc permet des essais intéressants sur le fonctionnement des organes en mouvement de la locomotive. On peut en effet, grâce à des appareils spéciaux (Stroborama de MM. SEGUIN ou Ultracinéma) étudier dans tous les détails les déformations que subissent les pièces de la machine en fonction de la vitesse et des efforts qu'on lui demande de développer.

On lira dans le numéro de septembre-octobre 1944 de la « Revue Générale des Chemins de fer » les résultats des essais au banc de Vitry d'une locomotive 141-P.

Bilan de l'utilisation des calories de la vapeur.

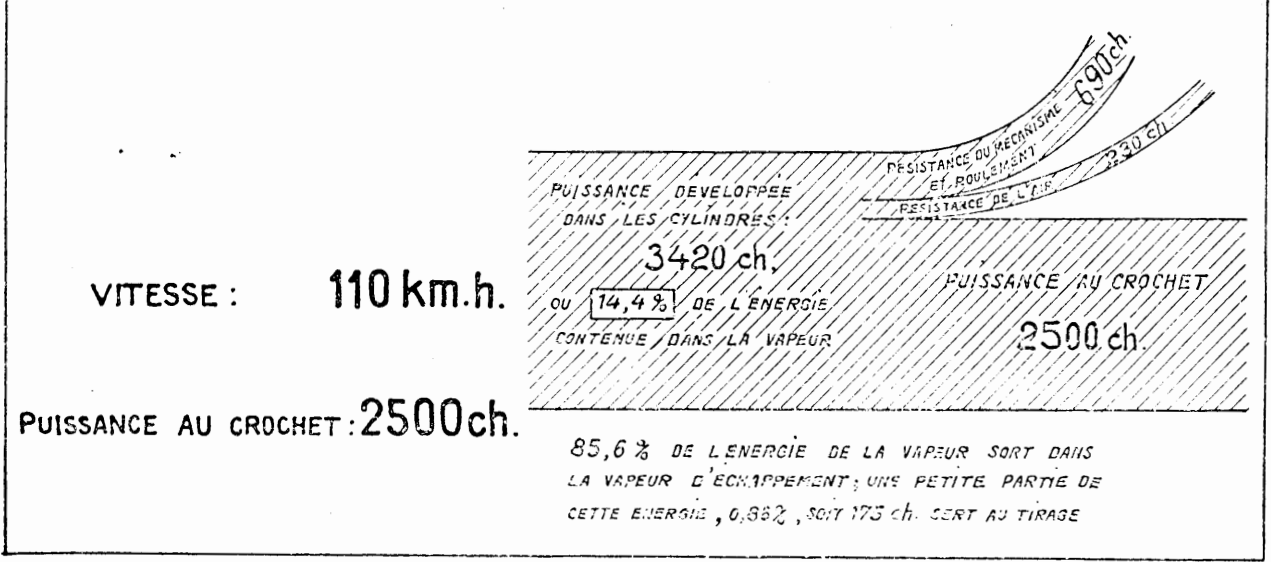
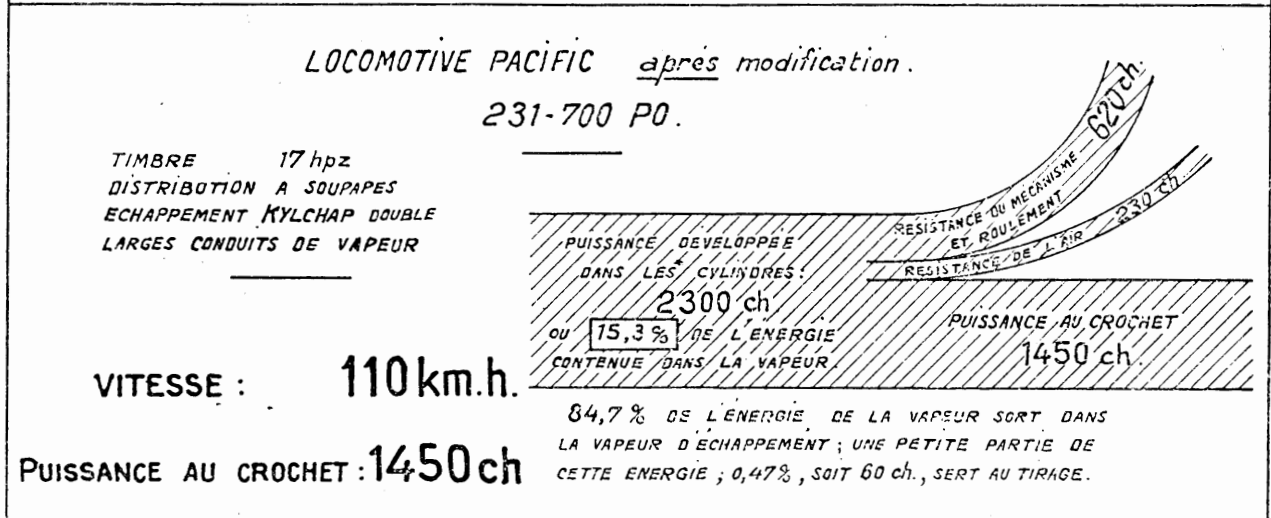
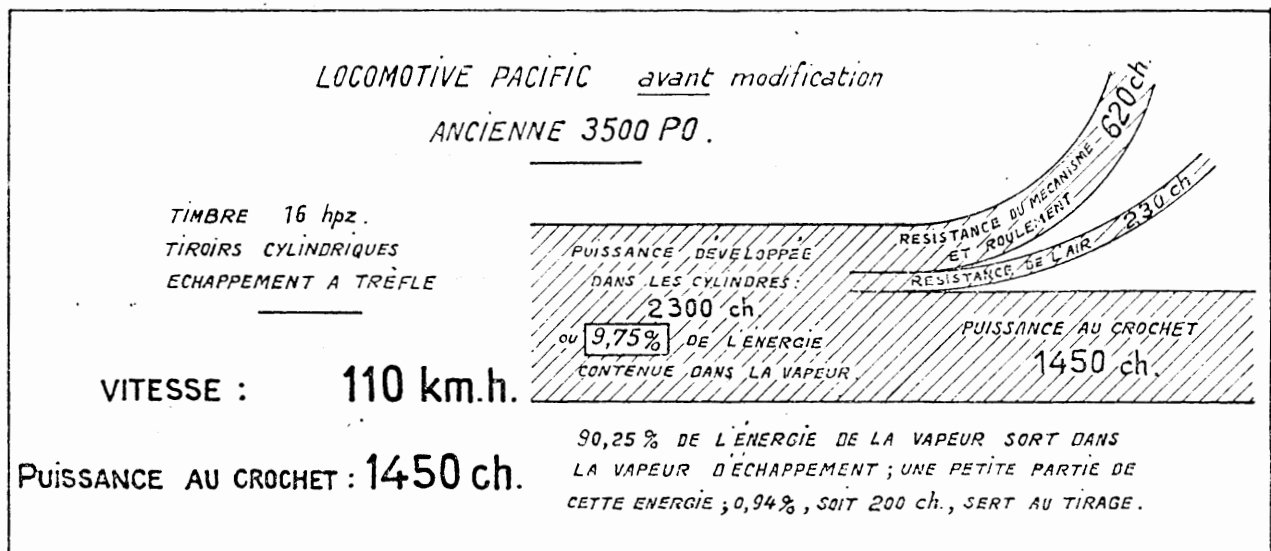


FIG. 269

B. — ESTIMATION COMPARATIVE DU RENDEMENT DES LOCOMOTIVES EN SERVICE COURANT

Pour estimer le rendement d'une locomotive de son parc, le chef de dépôt a comparé jusqu'ici sa consommation de charbon rapportée au km ou aux 100 t/km à celle moyenne de la série du dépôt ou de la Région. Les chiffres de ces consommations sont calculés à l'aide des états statistiques mensuels établis par le Service Régional.

Ces comparaisons n'ont de valeur indicative qu'autant que le service assuré par les locomotives comparées est de même nature et on ne saurait mettre en parallèle une machine marchant à 70 et une machine marchant à 120, ni une machine faisant un train direct et une assurant un train omnibus, ni une machine tirant un train lourd et une machine HLP.

Pour refléter fidèlement les valeurs relatives des rendements économiques des différentes unités d'une série de machines, on devrait donc de préférence, rapporter les consommations de charbon à l'unité d'énergie, au cheval-heure par exemple. Ce rapport exige l'évaluation de l'énergie totale nécessaire à la remorque de chaque train en fonction du tonnage, du profil de la ligne, de la vitesse de tracé et du nombre d'arrêts à l'aide d'abaques ou de formules simples mis à la disposition des intéressés (1).

Le calcul de cette énergie fictive évaluée à la jante est possible et relativement simple moyennant quelques approximations et suffisamment approchée sous réserve de ne pas trop s'écarter du train moyen.

L'évaluation de l'énergie réelle exigerait un wagon dynamomètre, elle est réservée aux essais expérimentaux. Les figures 267 B et C ont donné, par exemple, en fonction de la puissance au crochet, les consommations de charbon et d'eau par cheval-heure réel au crochet d'une 141-C SE. Les deux chiffres de consommation au cheval-heure fictif à la jante, d'une part, et au cheval-heure réel au crochet ou à la jante, d'autre part, peuvent donc différer sensiblement mais sans inconvénient pour la comparaison des rendements.

1° Détermination de l'énergie nécessaire à la remorque d'un train.

L'énergie fictive exprimée en cv. h nécessaire à la remorque d'un train peut être estimée par la formule :

$$W = \frac{(L + T)}{100} K (C_1 + h_1 + \alpha_1)$$

dans laquelle :

- L : tonnage de la machine en tonnes,
- T : tonnage du train en tonnes,
- K : parcours en km,
- C₁ : terme tenant compte de la résistance à l'avancement,
- h₁ : terme tenant compte du profil moyen de la ligne,
- α₁ : terme tenant compte du nombre d'arrêts.

La valeur de C₁ pouvant servir au calcul des primes d'économie de combustible est prise égale, en application de cette formule, suivant chaque catégorie de train et quel que soit son tonnage à :

Catégorie de train	Tonnage	Vitesse de tracé	C ₁	$\left(\frac{v}{16}\right)^2$
Express	500 t.	105	2,31	43
Express GV	600 t.	90	1,88	31,5
GV	600 t.	80	1,64	25
Omnibus	300 t.	80	1,70	25
Semi-direct	300 t.	75	1,55	22
GV	600 t.	75	1,52	22
PV	800 t.	54	1,57	11,5

(1) Une commission d'études procède actuellement à l'élaboration d'un nouveau système de détermination des primes à l'économie de combustible. Le but recherché est double :

1° Fixer à l'avance par type de machine, nature de train, section de ligne, saison, et non plus par kilomètre, les allocations de combustibles par unité de tonnage et les communiquer aux agents de conduite.

2° Permettre au mécanicien de calculer lui-même avant le départ la quantité de charbon allouée pour la remorque de son train et après l'arrivée l'économie faite. Cet agent pourra ainsi chiffrer immédiatement la prime proportionnelle qu'il aura réalisée et il y sera plus sensible.

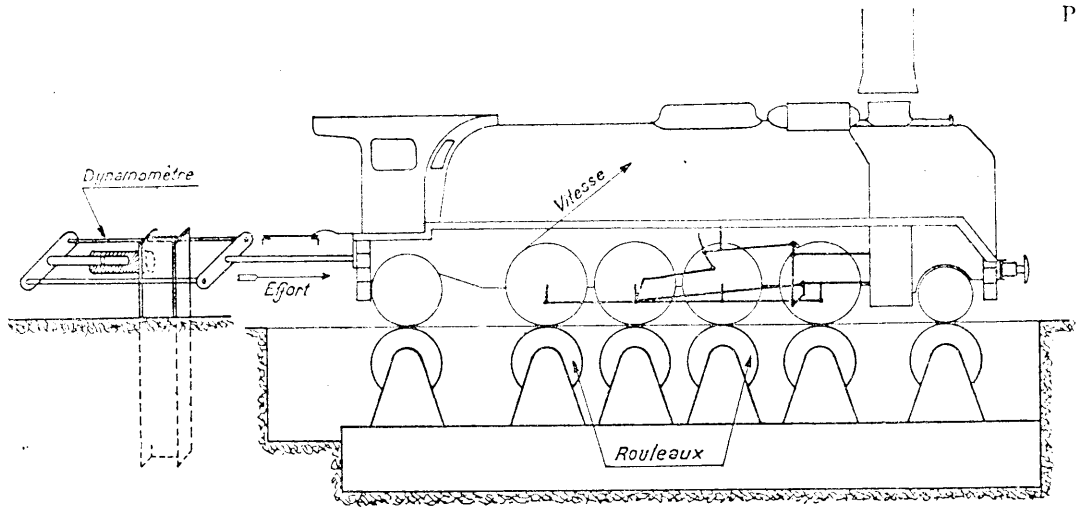
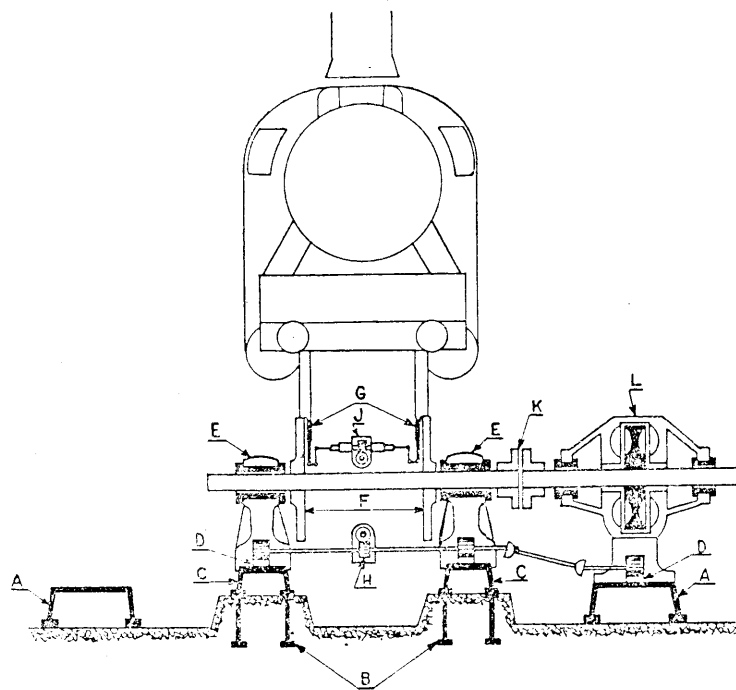


SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN BANC D'ESSAIS DE LOCOMOTIVES



BANC D'ESSAIS DE VITRY

- A - Banc des freins
- B - Châssis métallique d'encrage
- C - Banc des rouleaux
- D - Crémaillère
- E - Palier d'un rouleau
- F - Rouleau

- G - Plateforme élévatrice
- H - Arbre de commande du déplacement des paliers des rouleaux et des freins
- J - Arbre de commande de montée et de descente de la plateforme élévatrice.
- K - Accouplement flexible
- L - Frein Froude

FIG. 270

Le terme h_1 est égal à 0,37 h. La valeur de h est consignée dans des tableaux ligne par ligne et section par section.

Le terme α_1 est donné par la formule :

$$\alpha_1 = 0,37 \left(\frac{v}{16} \right)^2 \frac{N}{100}$$

dans laquelle :

v : vitesse de tracé en km/heure.

N : nombre d'arrêts ou ralentissements à 30 km/h ou vitesse inférieure, aux 100 km de parcours.

2° Facteurs influant sur la consommation de combustible rapportée à l'unité d'énergie (cv. h. fictif).

Ce sont :

- 1° L'énergie par unité de parcours nécessaire à la locomotive pour la remorque du train. Elle dépend elle-même du tonnage du train et de la vitesse moyenne.
- 2° L'utilisation (parcours plus ou moins élevé dans la période d'un mois).
- 3° La valeur professionnelle de l'équipe de conduite.
- 4° La qualité du combustible.
- 5° La saison.

a) **En ce qui concerne l'influence saisonnière**, la variation des consommations rapportées au km de l'ensemble des machines et de la Région pour dix années normales montre qu'en prenant comme base la consommation des mois juin-juillet-août, sensiblement constante, il faut attribuer aux différents mois de l'année les coefficients correctifs suivants :

juin-juillet-août	1
mai-septembre	1,03
avril-octobre	1,06
mars-novembre	1,09
décembre-janvier-février	1,12

Ces mêmes coefficients sont bien entendu, applicables aux allocations ou consommations de charbon rapportées au cheval-heure fictif.

b) En ce qui concerne l'utilisation de la locomotive :

— l'intensité d'utilisation permise par la banalité diminue les heures de stationnement au cours desquelles une machine à grand foyer consomme en pure perte 50 kg environ de charbon à l'heure. Les longs parcours diminuent aussi le nombre des mises en réserve du feu.

— les jets de feu accidentels se chiffrent par une perte de 200 à 500 kg suivant le cas.

c) **En ce qui concerne l'énergie kilométrique**, nous avons donné au § a précédent une formule qui permet de calculer la consommation de charbon en fonction de l'énergie développée.

Le taux d'équivalence énergie-charbon (c'est-à-dire la consommation de charbon par cv.h fictif) a été évalué sur un mois pour chaque série de machine (1). On admet ensuite que ce taux est constant, quel que soit le tonnage remorqué (2), mais il n'en est pas toujours ainsi.

Il existe également une corrélation entre la consommation au cv.h fictif et l'état d'usure de la locomotive (parcours depuis dernière RI).

La consommation au cv.h. fictif en est affectée approximativement comme suit :

	Coeff. correcteur
Machine sortant de réparation périodique	0,9
Machine à mi-parcours de R.P.	1
Machine à bout de parcours	1,1

Lorsqu'un chef de dépôt constate qu'une locomotive a une consommation unitaire exagérée de

(1) Le bureau des Primes détermine, au moyen des bulletins de Traction reçus des dépôts, l'énergie fictive en chevaux-heures nécessitée pour la remorque de chaque train, en faisant le produit du tonnage (train + machine) par la valeur de W , qui lui a été communiquée par le bureau des horaires pour chaque train. Il fait le total de l'énergie dépensée par la machine au cours du mois et, ajoutant ensuite toutes les machines de la même série de tous les dépôts, le total général de l'énergie fictive dépensée à la jante des machines de la série pendant le mois considéré. Parallèlement, le cumul, pour chaque machine d'une part, pour l'ensemble de toutes les machines de tous les dépôts d'autre part, de la série des bons de combustibles délivrés aux machines de la série, donne la consommation réelle pour les trains ayant donné lieu aux bulletins de Traction et assurés avec ce type de machine.

Le quotient de la consommation totale des machines au nombre total de chevaux-heures fictifs dépensés par les machines donne, pour le mois considéré, l'équivalent en kg. de charbon du cheval-heure fictif.

(2) Ceci revient à dire que l'allocation totale de charbon pour un train est calculée proportionnellement à son tonnage total avec l'allocation unitaire rapportée à la TKm roulante.

combustible non justifiée par les facteurs que nous venons d'examiner, la cause doit en être recherchée soit dans le mauvais rendement thermique (rl) de la chaudière, soit dans le mauvais rendement thermique (rr) du moteur (1), soit dans ces deux mauvais rendements à la fois.

Examinons d'abord le rendement du moteur.

f) Comparaison des rendements globaux des types de machines.

La comparaison des équivalents charbon et cv.h reflète mieux le rapport des rendements globaux des diverses séries de machines que les consommations de charbon rapportées au km ou aux 100 km qui ne sont pas des unités de travail.

Les résultats ci-dessous ne permettent pas de déduire par exemple, que les 141 C sont plus désavantageuses que les 231-H et qu'en cas d'excédent de machines de chacun de ces deux types pour assurer des trains remorquables par eux, il faille de préférence garer les 141-C (2).

Août 1916	Consommation au cv.h. fictif	Parcours mensuel	Energie kilométrique cv.h.
231-H	1,334	4025	15,9
141-C	1,832	2570	15,2

Les consommations au cv.h fictif, pour être rendues comparables, devraient être modifiées, d'une part d'un coefficient correcteur afférent au parcours mensuel (étant admis que les deux types de machines peuvent pratiquement assurer des parcours mensuels égaux), d'autre part d'un coefficient correcteur afférent à l'énergie kilométrique. Cette dernière correction implique la connaissance pour chaque type de machine de l'énergie kilométrique optimum correspondant au rendement optimum de l'engin, si l'on a la liberté du choix du tonnage et des horaires des trains. Il est certain, par exemple que les deux énergies kilométriques moyennes ci-dessus des 231-H et 141-C ne sont pas leurs énergies optima et que, d'autre part, les parcours mensuels des 141-C pourraient être accrus au niveau de ceux des 231-H.

3° Consommation d'eau d'une locomotive au cours de la remorque d'un train.

Un mauvais rendement thermique du moteur se traduit d'abord par une dépense exagérée de vapeur et par suite de combustible. Il est donc utile de comparer entre elles les dépenses d'eau des locomotives. Le relevé d'une consommation d'eau à un train peut être exécuté avec précision moyennant certaines précautions (voir manuel du chef-mécanicien) (3). En rapportant la dépense d'eau au cheval-heure fictif plutôt qu'au km. ou au 100 t.km. on obtiendra des valeurs qui resteront toujours comparables entre elles et par suite à une valeur moyenne caractéristique de la série, valeur que des sondages répétés sur la Région permettront de déterminer avec l'écart moyen d'erreur et ceci quel que soit le type de train ou le dépôt d'attache.

Cette mesure étant effectuée sur un seul train, indépendamment des consommations accessoires, élimine la cause d'erreur citée précédemment et provenant du rendement d'utilisation. Pour éliminer également la cause d'erreur ayant pour origine les variations de l'énergie kilométrique on devra choisir de préférence un train de puissance ou tonnage moyen.

Une seule mesure de dépense d'eau à l'occasion d'un train moyen permettra donc de savoir si le rendement thermique du moteur s'écarte de la moyenne admissible. Parmi les causes de dépense de vapeur exagérée on peut énumérer :

1° Les fuites diverses de la chaudière qui peuvent se remarquer et se mesurer facilement en stationnement en pression.

(1) Le rendement économique ou global (re) d'une machine est en effet égal (voir chap. VII tome III) à $re = rl \times rr \times rm$. Or le rendement mécanique (rm) n'est guère susceptible de variation d'une machine à l'autre, même dans le cas d'entretien douteux ou mauvais. Le rendement thermique du moteur (rr) est le produit du rendement thermique théorique rlh du cycle de Rankine par le rendement indiqué (ri). Le rendement thermique de la chaudière est rl .

(2) Pour d'autres séries plus anciennes, cette comparaison des équivalents charbon et cv.h pouvait se donner pour but le choix des séries à réformer.

(3) Ce relevé est relativement simple si la chaudière est étanche et si l'on a soin d'éviter les levées de soupapes et de mesurer aussi exactement que possible les pertes pour amorçage des injecteurs et arrosage du combustible. Il est beaucoup plus commode et plus exact que celui de la consommation de charbon (de nombreuses formules sont utilisées tenant compte, d'une part, des quantités introduites dans le foyer pour l'allumage, le montage du feu, pour porter la chaudière au timbre et durant la remorque du train, d'autre part, du poids de charbon et de résidus sur la grille à la fin du train).

Le calcul de la consommation des combustibles liquides est toutefois aussi facile et précis que celui de la consommation d'eau.

2° La surchauffe insuffisante qui diminue le rendement thermique du cycle (*r_{th}*), imputable au mauvais état du surchauffeur ou à la mauvaise conduite du feu; l'emploi d'un pyromètre permet les vérifications utiles.

La figure 275 donne les résultats de la consommation comparée de charbon par cv.h au crochet

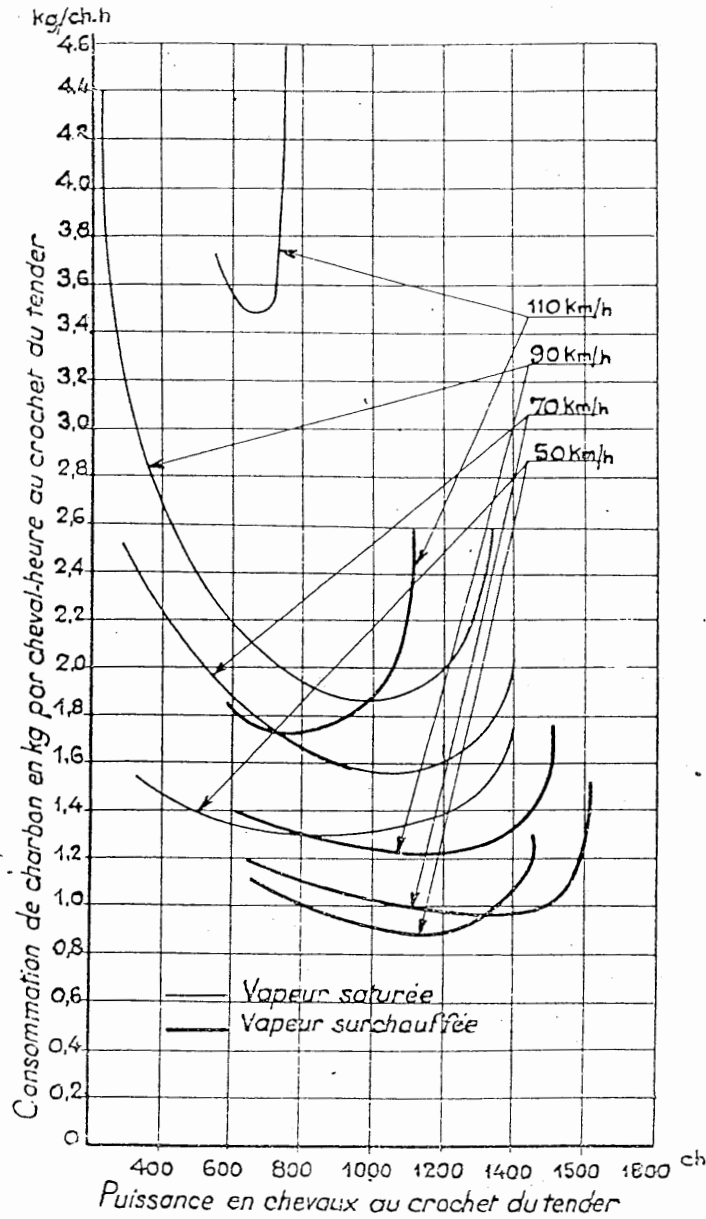


FIG. 275

du tender des mêmes machines Pacific compound type PO (roues de 1,85 m et timbrées à 16 hpz) sans surchauffe et avec (température 310°). Bien entendu, les courbes relatives à une machine de même type dont le degré de surchauffe serait insuffisant, c'est-à-dire inférieur à (310°-225° = 85°) se placeraient pour chaque vitesse entre les deux courbes limites correspondantes à cette vitesse. Les écarts de consommation seraient d'autant plus grands que les écarts de degrés de surchauffe le sont aussi et resteraient, comme on le voit, considérables à toutes les vitesses.

L'examen des courbes de la figure 275 fait encore ressortir le fait très important qu'il existe en

général, pour chaque vitesse et pour chaque type de machine, une puissance limite qui ne peut être dépassée quel que soit le cran de marche utilisé. Sur certains types de machines ayant reçu tous les derniers perfectionnements (échappement Kylchap, surchauffe élevée, agrandissement des sections de passage dans les conduits et distributeurs, etc.), ce plafond disparaît et ne peut être atteint, même aux très grandes vitesses et les courbes de consommation d'eau et de charbon restent à peu près horizontales (fig. 267 B et C).

L'examen des courbes 275 fait encore ressortir l'utilité pour les types de machines à plafond de

Influence du cran de marche BP Locomotive 3801 P.O

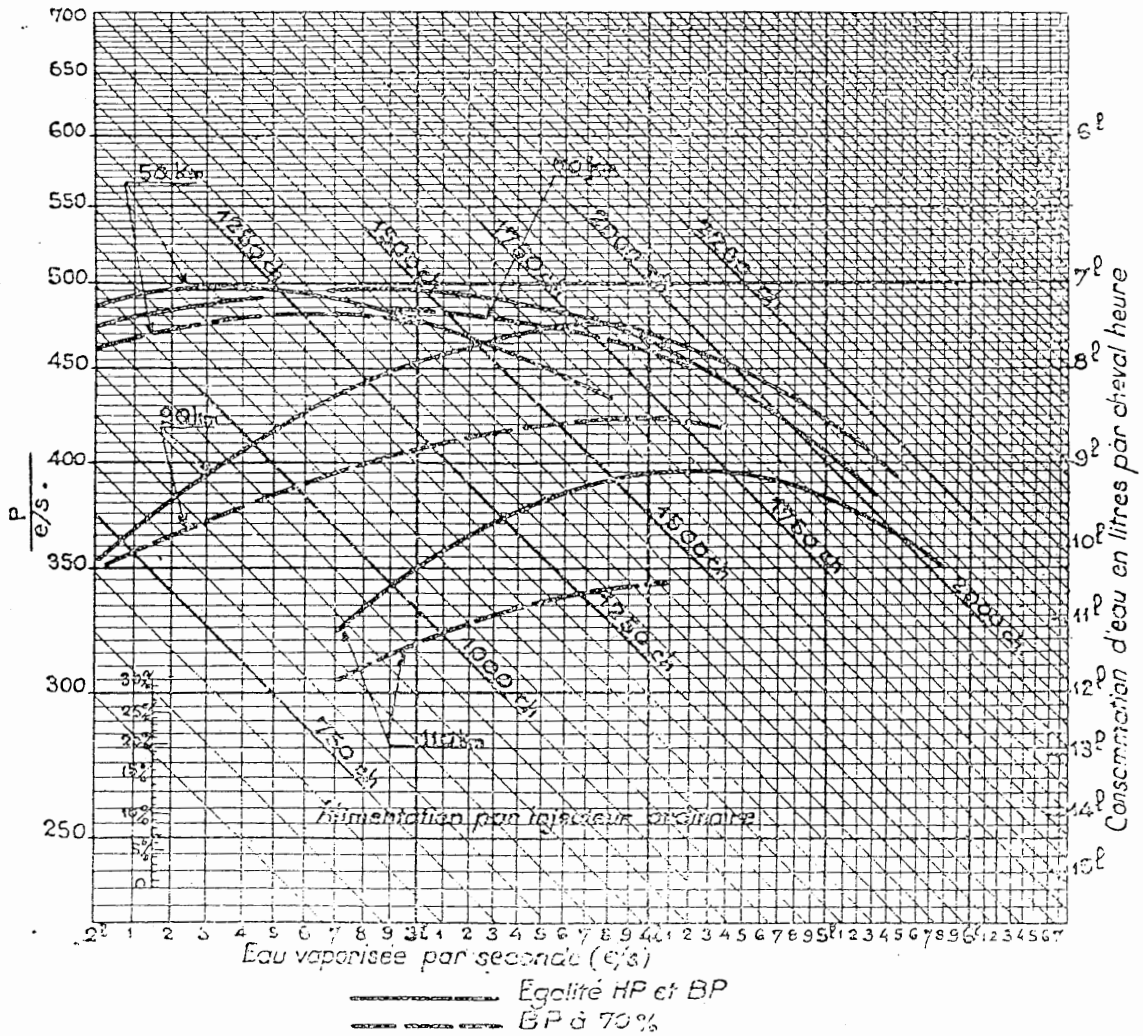


FIG. 276

puissance d'établir une courbe des consommations spécifiques d'eau en fonction de l'énergie kilométrique développée (1). Près de ce plafond, en effet, la consommation d'eau par cv.h croît très vite avec la puissance et ce serait s'égarer que de conclure d'une forte consommation relevée lors d'un train très dur, à un mauvais rendement thermique de la machine.

3° L'imperfection du mode de conduite du mécanicien. Il se manifeste surtout par le laminage au régulateur ou par l'opération similaire consistant sur les machines compound améliorées dans l'utilisation d'un cran de marche BP trop allongé.

(1) Du genre de la courbe représentée figure 241 ter tome V.

Pour trancher cette question du cran de marche BP optimum la Cie du P. O. a procédé à des expériences méthodiques, notamment sur l'une de ses machines de la série 231.800 à haute surchauffe (360°) cylindres BP à tiroirs Willoteaux et échappement KYLCHAP (1).

Les essais ont été effectués à vitesse constante avec locomotives-frein, d'une part avec des crans BP sensiblement égaux aux crans HP, sans descendre toutefois au-dessous de 35 %, et d'autre part, avec une admission BP fixe égale à 70 %.

Les courbes de la *figure 276* traduisent les résultats obtenus (2). On voit que, à 50 km/h pour une même consommation de 2,2 kilogrammes de vapeur par seconde, la locomotive développe au crochet du tender 1 100 ch lorsque le cran BP est égal au cran HP et 1 050 ch lorsque le cran BP est allongé à 70 %; le gain obtenu avec le premier mode de marche étant de 5 %. A 70 km/h un écart du même ordre est constaté à toutes les allures. Aux vitesses plus élevées, les différences s'accroissent au fur et à mesure que le débit de vapeur augmente; elles passent par un maximum puis décroissent, les crans de marche HP et BP tendant alors, par la force des choses, à devenir égaux.

Ainsi à 90 km/h pour un débit de 2,3 kg, on développe 855 ch avec la marche BP à 70 % et 910 ch avec la marche à crans égaux, soit un accroissement de puissance et de rendement de 7,5 %. Pour un débit de 3,7 kg la locomotive développe 1.560 ch avec la marche BP à 70 % et 1.750 ch avec la marche à crans égaux, soit un accroissement de puissance et de rendement en faveur de la marche à crans égaux, de 13 %. A 110 km/h pour un débit de 2,7 kg le gain atteint 7 % et, pour le débit plus fort, de 4 kg la locomotive développe 1.370 ch avec la marche BP à 70 % et 1.650 ch dans l'autre cas, soit un accroissement de puissance et de rendement, en faveur de la marche à crans égaux, de 15 %.

Les divers essais effectués sur d'autres locomotives ont confirmé l'avantage de la marche BP à crans relevés. Cet avantage cependant s'atténue au fur et à mesure que le circuit de vapeur de la machine présente par lui-même plus de laminages et est par conséquent moins parfait.

Cette *nécessité* d'adopter un cran de marche BP assez voisin du cran de marche HP, tout au moins jusqu'à un minimum de 35 à 40 % pour des machines ayant un rapport de volume entre les cylindres BP et HP de 2 à 2,5, est d'autant plus impérieux que la locomotive a reçu un circuit de vapeur plus parfait.

L'opinion encore trop ancrée que la marche BP allongée est plus avantageuse parce qu'elle permet aux machines de mieux courir, repose en fait, sur un malentendu; on se fie, en effet, à des apparences trompeuses, oubliant que le fait d'allonger la marche BP équivaut à allonger aussi la marche HP, le poids de vapeur introduit dans la machine étant alors plus grand que lorsqu'on marchait avec la BP relevée.

Les mécaniciens, attentifs à toutes les circonstances du fonctionnement de leur machine et notamment aux indications du manomètre de contre-pression ou du vacuomètre donnant le vide dans la boîte à fumée, n'auront pas manqué en effet de constater que, si leur machine courait mieux avec un cran de marche BP allongé, elle donnait lieu en même temps à un accroissement de la contre-pression et du vide dans la boîte à fumée, preuve tangible d'un accroissement de la quantité de vapeur introduite dans les cylindres.

Dès lors, on devra se demander ce qui se serait passé si, au lieu d'introduire cette quantité supplémentaire de vapeur par l'artifice indirect qui consiste à allonger la marche BP, on avait au contraire allongé la marche HP en maintenant la marche BP relevée.

Pour répondre à cette question, il sera facile de manœuvrer les marches de telle sorte que la contre-pression ou le vide dans la boîte à fumée restent les mêmes qu'avec la BP allongée, et l'on constatera effectivement que la machine court mieux encore.

Ce résultat découle en effet immédiatement du fait que, la machine étant plus économique avec la marche BP relevée, elle est capable en dépensant le même poids de vapeur, de développer plus de puissance et, par conséquent, de mieux courir.

4° Le dérèglement de la distribution qui se reconnaît à l'irrégularité des coups d'échappement.

5° Le mauvais rendement des auxiliaires (pompes à air et en particulier appareils d'alimentation à réchauffage). Voir à ce sujet, tome IV, page 339 et tome V, chapitre X, sous chapitre F, comment on peut évaluer les rendements de ces appareils.

La *figure 277* donne les résultats comparés de la consommation d'eau (ou de vapeur) en kg à l'heure prélevée au tender, des mêmes machines du type 4700 P. O. sans réchauffage ou avec (température de

(1) D'après « La locomotive à vapeur » de A. Chapelon.

(2) Dans ce nouveau mode graphique de représentation d'essais on porte en abscisse les débits caractérisant le régime, c'est-à-dire les consommations d'eau, de charbon ou de calories, suivant l'examen que l'on désire effectuer, et en ordonnées le rapport entre la puissance moyenne résultant des mesures effectuées pendant toute la durée d'un essai avec locomotive-frein, et les débits correspondants d'eau, de charbon ou de calories.

Comme l'inverse de ce rapport est proportionnel à la consommation d'eau, de charbon ou de calories par cheval-heure, on peut tracer une nouvelle échelle en fonction de ces données et même en fonction du rendement thermique, puisque l'inverse du rapport des calories fournies par seconde à la puissance développée mesure le rendement thermique.

Si l'on remarque encore que le produit des ordonnées par les abscisses correspond à l'équation $xy = \text{constante}$, on voit que les courbes d'équi-puissance sont des hyperboles équilatères. Le graphique permettrait donc de faire figurer, en même temps que les consommations et les débits, les puissances développées.

Pour simplifier les tracés on a choisi des échelles logarithmiques, les hyperboles équilatères devenant alors des lignes droites et le graphique acquérant une nouvelle propriété, à savoir que la valeur absolue des différences d'ordonnées entre deux courbes quelconques représente les écarts relatifs entre ces ordonnées. Ceci a permis d'ajouter sur le graphique une échelle proportionnelle permettant de mesurer d'un seul coup d'œil la valeur relative des diverses améliorations.

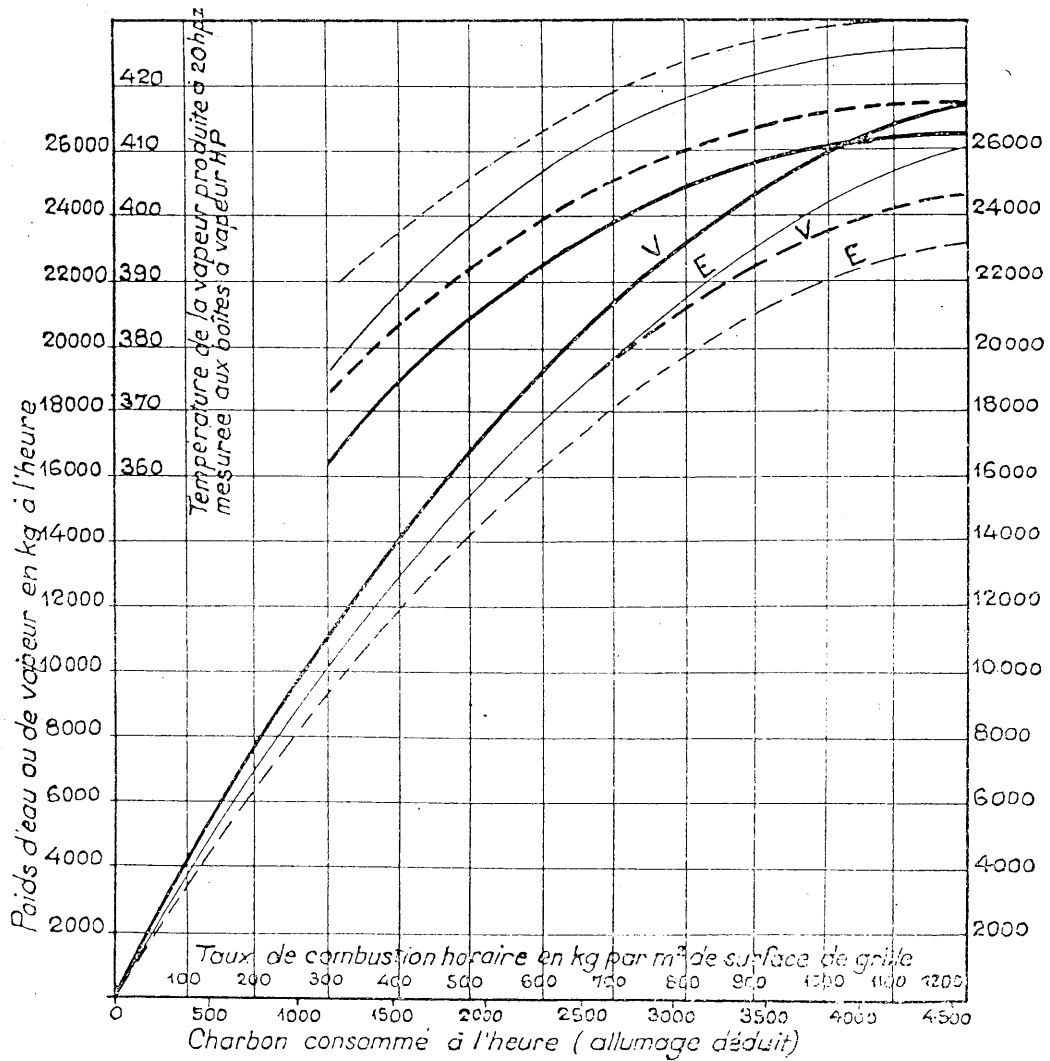
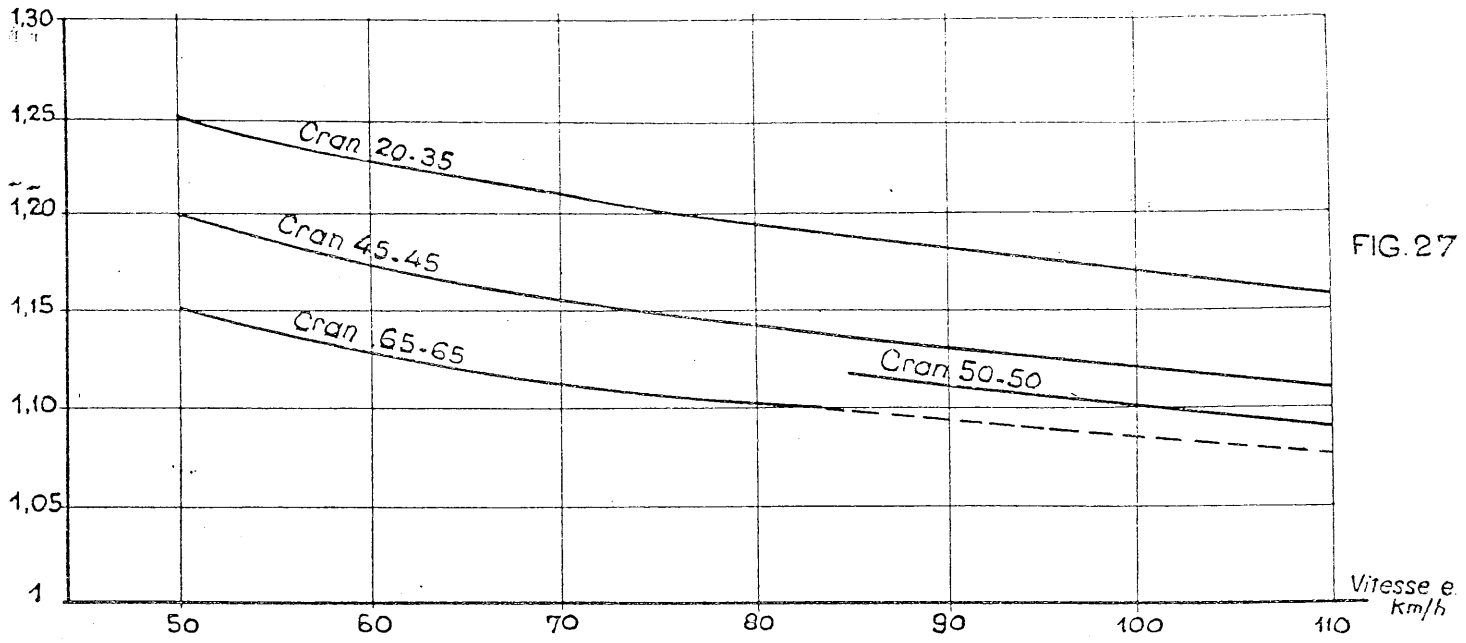


FIG. 277

100° de l'eau). Bien entendu, la courbe relative à une machine de même type dont la température de l'eau d'alimentation ou le rendement de la pompe serait défectueux se placerait entre les deux courbes E.

Les courbes V sont relatives à la quantité de vapeur délivrée aux cylindres.

6° Le défaut d'étanchéité des organes moteurs et distributeurs.

La figure 278 montre que l'accroissement par cv/heure indiqué de consommation de vapeur dû aux fuites (à l'exclusion de celui dû aux phénomènes d'action de paroi), c'est-à-dire le rapport de la consommation de vapeur réelle (consommation apparente d'après le diagramme plus perte totale par

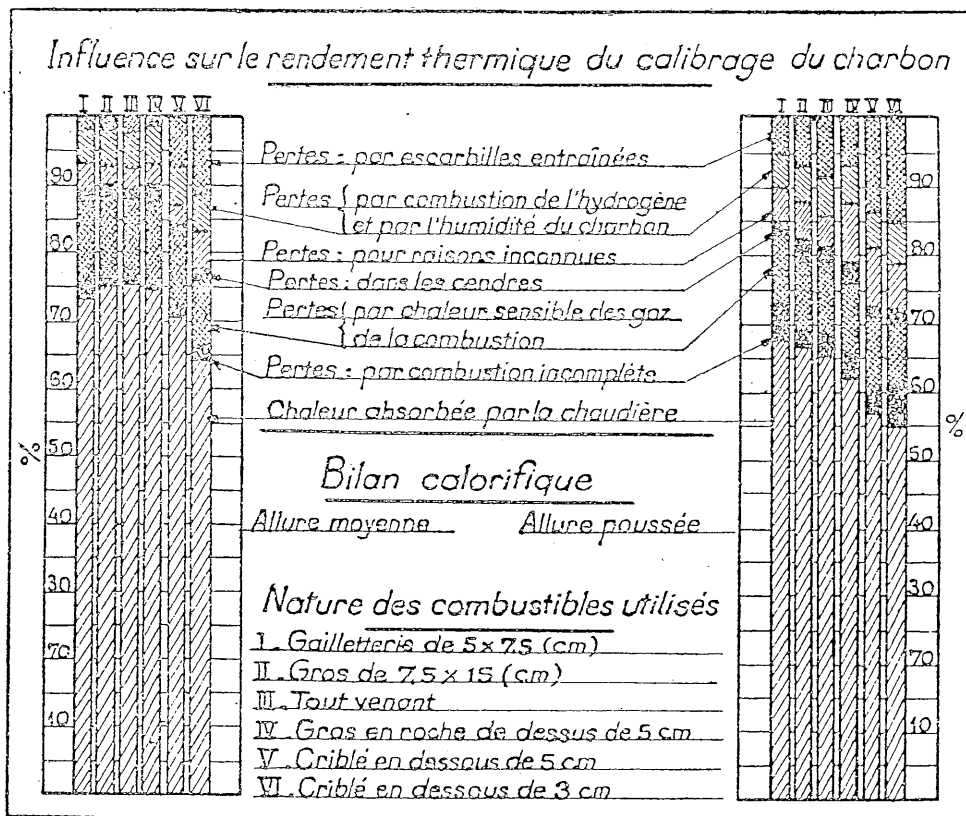


FIG. 279

fuites) à la consommation apparente est d'autant plus grand que le cran de marche et la vitesse sont faibles.

Les épreuves d'étanchéité s'exécutent comme indiqué au chapitre III § D 2°.

La détermination de la quantité de vapeur perdue du fait de l'inétanchéité des organes, telle qu'elle est préconisée très sommairement au manuel du visiteur est sans grande valeur indicative et sans aucune valeur relative.

Pour rechercher le rôle que peuvent jouer les fuites dans la consommation de vapeur, il faudrait déterminer d'abord pour chaque type de machine les coefficients de débit relatifs aux fuites pouvant se produire soit à travers les distributeurs, soit à travers les segments de piston, calculer ensuite à l'aide de la formule des pertes de charges, pertes qui sont proportionnelles à la racine carrée des chutes de chaleur, les quantités de vapeur perdues par fuites à travers chaque organe, pour chaque cran de marche et pour chaque vitesse. On devrait au surplus tenir compte du fait que la vapeur ayant fui n'est pas toujours entièrement perdue, soit qu'elle travaille pendant la détente, soit qu'elle travaille dans les cylindres BP. Finalement, la quantité de vapeur ainsi perdue devrait être rapportée au travail développé exprimé en cheval-heure. Cette méthode de calcul et la méthode expérimentale utilisées ainsi sommairement indiqués ne peuvent encore être considérés comme exactes qu'en première approximation.

4° Influence du rendement de la chaudière.

Considérons maintenant l'autre facteur principal, cause d'une consommation exagérée de combustible d'une machine considérée isolément : le rendement thermique de la chaudière.

Supposons que la consommation réelle de charbon au cv.h. fictif de la machine en cause dépasse de 30 % la valeur du cv.h. fictif en kg de charbon déterminée par le Service Régional. Admettons que l'essai de consommation d'eau de cette machine ait montré qu'elle dépassait de 20 % la consommation moyenne de la série au cv.h. fictif, déterminée par l'expérience. On peut en conclure que la baisse du rendement thermique de la chaudière est cause d'un accroissement de consommation de combustible de $30 - 20 = 10$ % et que les causes de cette baisse de rendement sont à rechercher.

Parmi les causes principales on peut énumérer :

- l'avarie ou le dérèglement de l'échappement,
- des fuites de vapeur ou rentrées d'air dans la boîte à fumée,
- des fuites dans le foyer,
- un circuit d'air insuffisant (tubes bouchés, grille à flammèche encrassée, grilles, cendrier, voûte trop courte ou absente),
- une mauvaise conduite du feu :

Revoir à ce sujet tome III pages 44 à 46 les causes de pertes de rendement thermique de la chaudière et l'influence qu'elles peuvent avoir.

Il subsiste certains facteurs susceptibles d'influer sur le rendement thermique de la chaudière et dont on ne peut tenir compte :

- celle du calibrage du charbon.

La *figure 279* montre que le rendement d'autant plus grand que le charbon contient moins de menus aux très fortes allures; aux allures moyennes le chargement le meilleur est le tout-venant (comportant des gros morceaux mélangés à du menu).

Voir également la *figure 101* du tome III.

- celle due à la qualité du charbon et notamment à son pouvoir cokéfiant (voir *fig. 102* tome III).
- celle due au mode de chauffe (pelle ou stocker).