

# NOTE

## SUR LES

# ÉCHAPPEMENTS DE LOCOMOTIVES

### RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

EFFECTUÉES A LA COMPAGNIE DE PARIS-ORLÉANS

Par **M. André CHAPELON,**

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES,  
INSPECTEUR DU MATÉRIEL A LA COMPAGNIE D'ORLÉANS.

#### A. — INTRODUCTION.

Les Chemins de fer auront à célébrer, bientôt, le centenaire du concours fameux de Liverpool à Manchester où, le 9 Octobre 1829, la « Fusée » de G. Stephenson réalisant, après 25 ans de labeur assidu (1), le type accompli de la locomotive à vapeur, remporta le plus remarquable des succès.

« Seule parmi ses concurrentes, la « Rocket » avait plus que réalisé les conditions du concours, en traînant derrière elle une charge de 12.942 kg à la vitesse de 22,5 kmh en palier.

» Haut le pied et sur le même profil, elle avait atteint la vitesse encore irréalisée de 56 kmh ».

Pour la première fois se trouvaient réunis sur une locomotive la « chaudière tubulaire » et « l'échappement de la vapeur dans la cheminée » pour y produire le tirage forcé.

Il n'est pas douteux que la réussite de G. Stephenson était due à cette heureuse combinaison (2).

Imaginée par M. Seguin (brevet du 20 Décembre 1827), puis peu après par Booth, la chaudière tubulaire apportait à la nouvelle machine la puissance et le rendement de vaporisation, fonctions vitales qui lui avaient jusque là fait défaut.

(1) La première locomotive due à Trewithick et Vivian date de 1804.

(2) Marc Seguin avait compris dès l'origine que le tirage forcé était indispensable au bon fonctionnement de la chaudière tubulaire à cause de la grande résistance qu'offrait cette chaudière à la circulation des gaz. La première locomotive construite par lui en 1828 comportait, à cet effet, deux ventilateurs qui soufflaient l'air comburant sous la grille.

La Fusée, sortie tout d'abord de construction sans l'injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée, donna de mauvais résultats par suite du manque de tirage ; elle fut rénovée et devint la victorieuse du plateau de Rainhill le jour où G. Stephenson lui appliqua ce mode d'échappement.

Inventée par Trewithick (patente de 1802), retrouvée par Hachworth en 1825, l'injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée dotait la locomotive du tirage puissant qu'exigeaient à la fois la chaudière tubulaire et l'intensité exceptionnelle de la combustion nécessaire à l'obtention d'une production de vapeur suffisante.

Ce mode d'échappement établissait, en outre, cette liaison remarquable entre la dépense de vapeur du moteur et la production de la chaudière assurant, d'une manière particulièrement heureuse, le réglage automatique de l'activité de la combustion.

L'injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée à laquelle revenait une part si importante du succès de 1829 n'a pas cessé d'exercer depuis une influence toujours profonde sur le fonctionnement général de la locomotive à vapeur.

Suivant les dispositions plus ou moins bonnes adoptées pour cette partie de la machine, le tirage obtenu l'est au prix de contrepressions sur les pistons qui peuvent entraîner parfois une diminution sensible du travail moteur.

Inversement si, pour réduire la valeur de ces contre-pressions, on n'avait d'autre ressource que celle d'élargir la tuyère d'échappement, quitte à perdre sur l'intensité du tirage, il pourrait en résulter, en général, une moindre perfection de la combustion, inconvénient souvent plus grave que celui dû à l'excès de contrepression que l'on cherchait à éviter.

L'idéal apparaît donc comme devoir être atteint quand le « rendement énergétique » de l'appareil de tirage est le plus grand possible, c'est-à-dire lorsque l'appel d'air maximum est obtenu avec le minimum de pression de la vapeur dans la colonne d'échappement.

On trouvera dans la présente note, en même temps qu'un exposé sommaire des conditions de fonctionnement de l'échappement des locomotives, la description de types d'échappements nouveaux qui, tout en conservant la forme si ingénieuse et si simple imaginée par Trewithick il y a 126 ans, réalisent un rendement énergétique élevé, tout à fait comparable à celui qui pourrait être obtenu à l'aide de turbo-ventilateurs infiniment plus compliqués.

## B. — GÉNÉRALITÉS.

### I. — NÉCESSITÉ DU TIRAGE FORCÉ.

Les limitations étroites imposées par le gabarit aux dimensions de la locomotive, l'intérêt de réaliser une grande puissance massique, qualité maîtresse de tout véhicule automoteur rapide, ont conduit, dès l'origine, aux allures de combustion intenses usitées dans les locomotives à vapeur.

De 800 kg sur la Fusée de Stephenson, la vaporisation horaire était passée à 5.000 kg sur les Crampton de 1850 et à 10.000 kg sur les machines Express de 1900 ; dans nos machines Pacific d'aujourd'hui elle peut atteindre 17.000 kg et s'élève à 35.000 dans les mastodontes américaines.

De telles puissances de vaporisation correspondent par  $m^2$  de surface de grille et par heure à une production de 4.000 à 5.000 kg de vapeur et une consommation de 600 à 1.000 kg de charbon.

Dans la pratique courante, d'aussi fortes allures ne sont évidemment pas toujours atteintes, mais on produit couramment 2.500 à 3.500 kg de vapeur et l'on consomme 300 à 500 kg de charbon par  $m^2$  de surface de grille et par heure.

Réalisées avec une chaudière où l'extrême division du flux gazeux entraîne des frottements considérables, de telles conditions de marche imposent nécessairement l'emploi du tirage forcé.

## II. — MANIÈRE D'OBTENIR CE TIRAGE.

On peut obtenir le tirage forcé de deux manières :

Soit en aspirant les fumées à la sortie de la chaudière (tirage aspiré) ;

Soit en soufflant sous la grille l'air nécessaire à la combustion (tirage soufflé).

Cette dernière solution, employée par Seguin en 1828, était réalisée au moyen de deux ventilateurs de grande dimension, placés sur le tender de la locomotive et actionnés par les roues arrière de ce véhicule.

Malgré les bons résultats obtenus (1), cette disposition un peu compliquée ne fût pas conservée sur les machines de construction postérieure.

Avec ce mode de tirage, en effet, il se produisait, aux points où la grille se dégarnissait, des effets de chalumeau extrêmement destructeurs qui obligèrent à y renoncer. D'autre part, le foyer est en surpression, ce qui provoque des retours de flammes et rend difficile le chargement à la main.

Sur la machine de Seguin où la pression de soufflage n'atteignait que 16 à 20 mm d'eau dans le cendrier, ce dernier inconvénient n'avait évidemment qu'une faible importance, mais il aurait été extrêmement grave, au point de rendre tout service impossible, sur les locomotives plus poussées employées par la suite.

La solution du tirage aspiré fut universellement préférée, sans doute grâce à la forme si ingénieusement simple sous laquelle Trewithick l'avait réalisée sur sa locomotive de 1804 en envoyant simplement dans la cheminée la vapeur qui s'échappait des cylindres.

L'intérêt de cette solution fut vite mis en lumière par la pratique courante de tous les jours et, depuis le succès fameux de la « Rocket » de G. Stephenson, succès vraisemblablement dû, comme on l'a vu plus haut, à l'emploi combiné de la chaudière tubulaire et du tirage forcé, toutes les locomotives ont reçu le système d'échappement imaginé par Trewithick.

Les exceptions à cette règle ont été si rares que nous ne les aurions pas mentionnées si l'on n'avait vu réapparaître tout récemment (essais de l'Atchison Topeka and Santa Fé, 1910 ; et essais du professeur Goss, 1926) le tirage par turbo-ventilateur aspirant, système essayé déjà par Serve en 1895, mais actionné dans ces dernières applications par la vapeur d'échappement à sa sortie des cylindres.

On verra par la suite, comme nous le signalons encore plus haut, que les derniers perfectionnements apportés à l'échappement classique des locomotives à vapeur lui assurent un rendement énergétique tel que les meilleurs turbo-ventilateurs infiniment plus compliqués, délicats et coûteux, auraient sans doute beaucoup de peine à le dépasser.

## III. — THÉORIE DE L'ÉCHAPPEMENT DES LOCOMOTIVES.

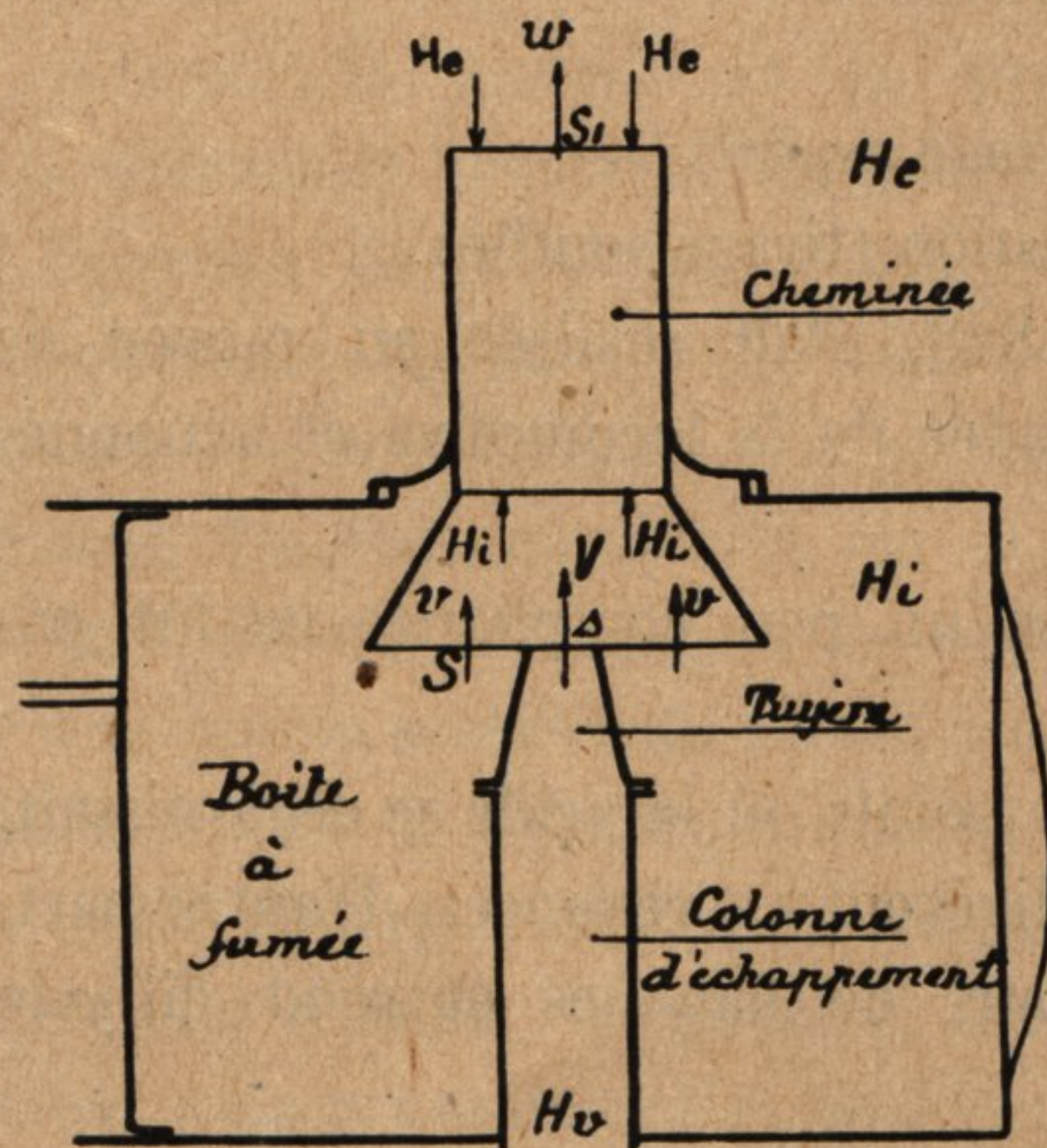
On vient de voir que le tirage était obtenu dans les locomotives en lançant dans la cheminée la vapeur qui s'échappe des cylindres après y avoir accompli son travail utile.

---

(1) 100 kg de charbon brûlés par  $m^2$  de surface de grille et par heure, sur une grille de 0  $m^2$ ,975 de surface.  
750 kg de vapeur produite à l'heure, à la pression de 3 atm.

A cet effet le tuyau d'échappement se termine par une tuyère qui constitue avec la cheminée (Fig. 1) un véritable éjecteur, aspirant les produits de la combustion et les refoulant à l'atmosphère.

Fig. 1.



Comme pour la plupart des phénomènes complexes rencontrés dans les machines en fonctionnement, la théorie de l'échappement des locomotives n'est pas encore achevée.

Les principes de l'énergétique permettent cependant, moyennant certaines hypothèses, de trouver les lois générales de fonctionnement du dispositif employé.

Les conclusions fondamentales d'une telle étude théorique entreprise pour la première fois par Zeuner et publiée par lui en 1863, reçurent aussitôt une confirmation éclatante dans les résultats de l'étude expérimentale que, par un curieux hasard, et dans l'ignorance complète des travaux du savant professeur de Zurich, poursuivaient simultanément Nozo et Geoffroy aux chemins de fer du Nord. Le compte rendu de ces

expériences fut publié dans le bulletin de la Société des Ingénieurs Civils de France à la fin de l'année 1863.

On peut esquisser comme il suit la théorie énergétique de l'échappement des locomotives.

Soient :

- $H_i$  la pression absolue régnant à l'intérieur de la boîte à fumée ;
- $H_e$  la pression absolue régnant à l'extérieur ;
- $h$  la différence entre ces pressions, c'est-à-dire la dépression dans la boîte à fumée ;
- $s$  la section de sortie de la tuyère par laquelle s'écoule la vapeur d'échappement, en tenant compte du coefficient de contraction s'il y a lieu ;
- $S$  la section annulaire par laquelle entrent les gaz de la combustion dans la cheminée ;
- $S_1$  la section de la cheminée ;
- $V$  la vitesse de la vapeur à la sortie de la tuyère ;
- $v$  la vitesse des gaz de la combustion dans leur passage à travers la section  $S$  ;
- $w$  la vitesse du mélange de la vapeur et des gaz à la sortie de la cheminée ;
- $\gamma$  la masse spécifique de la vapeur d'échappement ;
- $\delta$  la masse spécifique des gaz de la combustion ;
- $T$  le tempérément de la chaudière, facteur caractérisant la facilité avec laquelle les gaz circulent à travers cette chaudière et défini par la relation :

$$(1) \quad T = \frac{Q}{\sqrt{h}}$$

$Q$  étant le volume des gaz débités par seconde sous la dépression  $h$  régnant dans la boîte à fumée.

Supposons :

- 1° Que le mélange entre la vapeur et les gaz soit parfait à la sortie de la cheminée ;
- 2° Que le mélange se fasse à la pression constante  $H_i$  de la boîte à fumée.

Appliquons le théorème des quantités de mouvement aux masses de fluide qui entrent et qui sortent de la cheminée pendant l'unité temps.

Remarquons de plus que ce théorème éliminant l'action des forces intérieures au système considéré, les résultats qu'on peut en déduire sont valables quels que soient les frottements internes des fluides contre eux-mêmes ou contre les parois qui les guident et quels que soient les remous ou tourbillonnements qui puissent prendre naissance.

On obtient la relation :

$$(2) \quad (\delta Sv \cdot v + \gamma sV \cdot V) - (\delta Sv + \gamma sV) w = (H_e - H_i) S_1$$

Comme les pressions aux différents points du circuit parcouru par les gaz ont des valeurs absolues très voisines, leurs volumes spécifiques sont sensiblement constants et l'équation de continuité du débit peut s'écrire :

$$(3) \quad S_1 w = sV + Sv$$

Remplaçant la différence  $H_e - H_i$  par sa valeur  $h$  et remarquant que l'expression (1) du tempérament de la chaudière peut se mettre sous la forme :

$$T = \frac{Sv}{\sqrt{h}}$$

d'où

$$(4) \quad h = \frac{S^2 v^2}{T^2}$$

la relation (2) peut s'écrire, en mettant en évidence les deux rapports  $\frac{v}{V}$  et  $\frac{s}{S_1}$  et après avoir posé  $S = \alpha S_1$ ,

$$(5) \quad \left(\frac{v}{V}\right)^2 \left[ \alpha \delta (1 - \alpha) - \frac{S_1^2}{T^2} \alpha^2 \right] - \alpha \left(\frac{v}{V}\right) \left(\frac{s}{S_1}\right) (\gamma + \delta) + \gamma \frac{s}{S_1} \left(1 - \frac{s}{S_1}\right) = 0$$

Cette expression peut encore se mettre sous la forme suivante en faisant apparaître le rapport :

$$(6) \quad \lambda = \frac{v S}{V s}$$

des volumes ou des masses des gaz aspirés et de la vapeur aspirante en admettant comme simplification l'égalité  $\delta = \gamma$  des masses spécifiques de ces fluides, condition sensiblement réalisée pratiquement :

$$(7) \quad \lambda \left[ \frac{S_1^2}{\delta T^2} - \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right] + 2\lambda - \left( \frac{S_1}{s} - 1 \right) = 0$$

d'où

$$(8) \quad \lambda = \frac{-1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{S_1^2}{\delta T^2} - \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right] \left[ \frac{S_1}{s} - 1 \right]}}{\frac{S_1^2}{\delta T^2} - \frac{1 - \alpha}{\alpha}}$$

Cette relation met en évidence les propriétés les plus remarquables de l'échappement des locomotives, propriétés qui peuvent s'énoncer comme il suit :

1° La masse des gaz aspirés par une masse donnée de vapeur d'échappement est d'autant plus grande :

- a) que la section  $s$  de la tuyère d'échappement est plus petite ;
- b) que le tempérament  $T$  de la chaudière est plus grand.

2° Pour une chaudière donnée et une section de tuyère donnée ( $T = C^{\text{te}}$ ,  $s = C^{\text{te}}$ ), il existe une valeur de la section  $S_1$  de la cheminée qui rend maximum le rapport de la masse des gaz aspirés à la masse de la vapeur aspirante.

Les propriétés énoncées aux § 1° a) et 1° b) montrent que le tirage peut être réglé :

Soit en faisant varier la section de la tuyère d'échappement ; c'est la solution réalisée par les échappements variables ;

Soit en agissant sur le tempérament de la chaudière en faisant varier par exemple l'ouverture des portes du cendrier ; c'est la solution possible avec les échappements fixes.

Mais l'équation (8) montre aussi que, pour une chaudière donnée et une section de tuyère d'échappement invariable, le rapport du poids des gaz aspirés au poids de la vapeur aspirante est lui-même constant.

Le tirage est donc automatiquement proportionné à la puissance de production de la chaudière et l'intérêt des dispositifs destinés à régler ce tirage se trouve donc singulièrement amoindri.

#### IV. — RÉSULTATS D'EXPÉRIENCE.

Les conclusions générales de la théorie se sont trouvées vérifiées non seulement par les expériences précises d'expérimentateurs tels que Nozo, Geoffroy, Zeuner, Prussmann, von Borries, Strahl, Legein, etc... mais encore par la pratique courante de tous les jours.

Les praticiens connaissent tous, par exemple, l'influence considérable que peut avoir la section de la tuyère d'échappement sur les conditions de marche de la locomotive.

On sait encore qu'une tuyère d'échappement fixe, de section bien réglée, convient pratiquement pour toutes les allures de marche de la locomotive, à moins que le combustible employé ne devienne exceptionnellement mauvais, ce qui nécessiterait un nouveau réglage de la tuyère.

#### V. — RELATION ENTRE LE TIRAGE ET LA COMPRESSION DANS LA COLONNE D'ÉCHAPPEMENT.

La formule (8) nous a montré que le rapport entre la masse des gaz aspirés et la masse de la vapeur aspirante était constant pour une chaudière déterminée.

On a donc :

$$(9) \quad \lambda = \frac{\delta v S}{\gamma V s} = C^{\text{te}}$$

mais le volume des gaz aspirés  $vS$  est lié au tempérament  $T$  de la chaudière et à la dépression  $h$  existant dans la boîte à fumée par la formule (4) d'où l'on tire :

$$Sv = T \sqrt{h}$$

D'autre part, si l'on appelle  $C_p$  la différence entre la pression atmosphérique  $H_e$  et la pression  $H_v$  existant dans la colonne d'échappement, c'est-à-dire la contrepression dans la colonne d'échappement on a la relation :

$$(10) \quad \frac{V^2}{2} = \frac{C_p}{\gamma}$$

( $\gamma$  = masse spécifique de la vapeur d'échappement) valable pour toutes les valeurs de la contrepression  $C_p$  couramment rencontrée dans la pratique.

On en tire :

$$v = \sqrt{2 \frac{C_p}{\gamma}}$$

et finalement l'équation (9) prend la forme :

$$\lambda = \frac{\delta T \sqrt{h}}{\gamma s \sqrt{2 \frac{C_p}{\gamma}}}$$

ou bien :

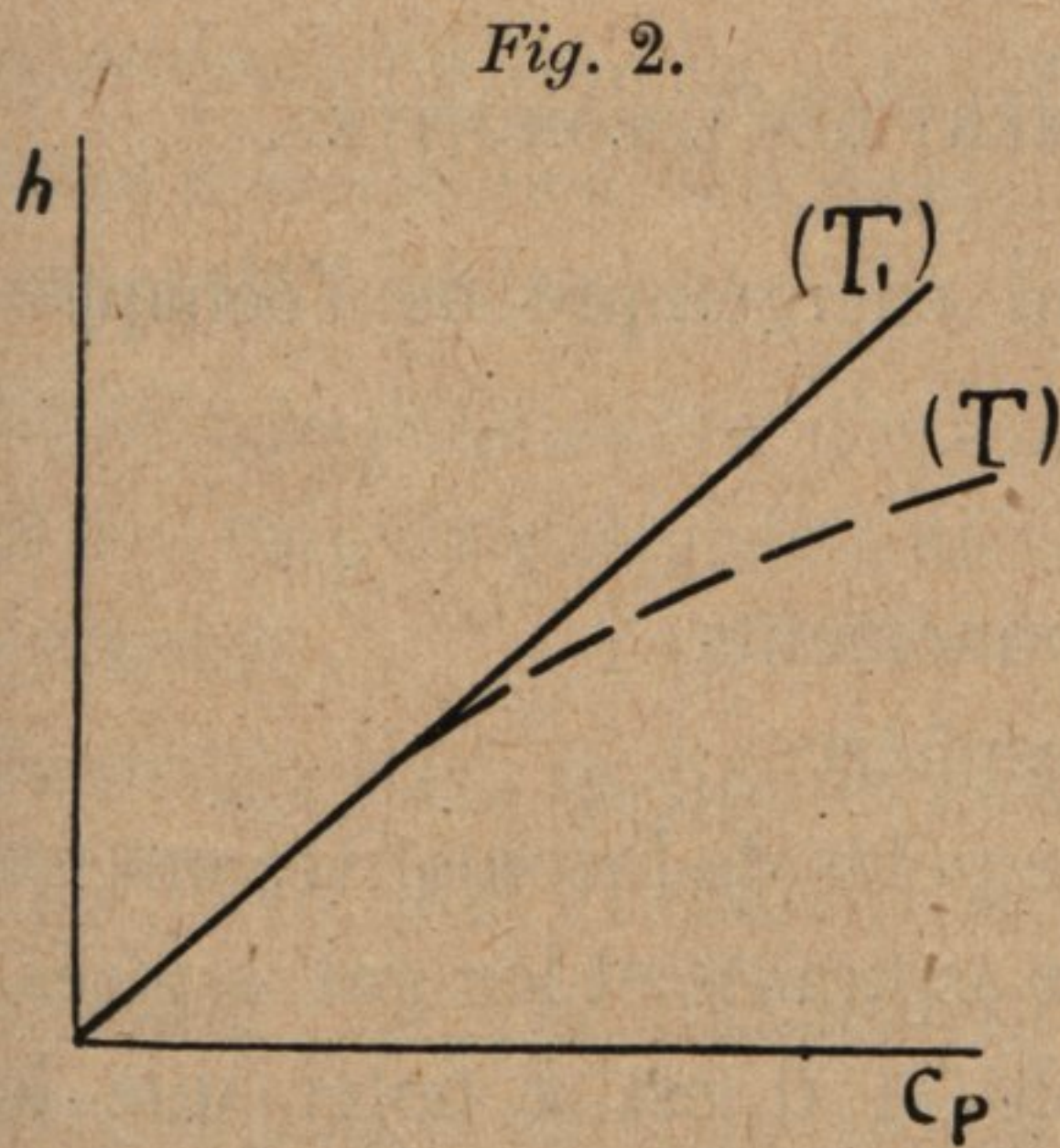
$$(11) \quad \frac{h}{C_p} = K \left( \frac{s}{T} \right)^2 \quad (K \text{ étant une constante})$$

formule dans laquelle  $s$  et  $T$  doivent être considérés comme invariables.

Dans une machine donnée il existe donc théoriquement un rapport constant entre la dépression  $h$  produite dans la boîte à fumée et la contrepression  $C_p$  existant au même instant dans la colonne d'échappement.

#### VI. — COURBE CARACTÉRISTIQUE DE L'ÉCHAPPEMENT.

Si l'on représente graphiquement les variations de la dépression  $h$  dans la boîte à fumée en fonction de la contrepression  $C_p$  dans la colonne d'échappement, on obtient une courbe ( $\Gamma$ ) (Fig. 2) qui caractérise les propriétés de l'échappement considéré.



D'après la formule (11) cette courbe devrait théoriquement être une ligne droite ( $\Gamma_1$ ).

Pratiquement, comme les échappements réels ne sont pas parfaits, la courbe ( $\Gamma$ ) d'équation  $h = f(C_p)$  (12) se détache plus ou moins de la ligne droite pour s'incurver du côté de l'axe des contrepressions.

Le tracé sur un même graphique des courbes caractéristiques relatives à différents types d'échappement permettra facilement d'en comparer l'efficacité, le meilleur système étant évidemment celui qui permettra d'obtenir le tirage d'une intensité déterminée pour la contre-pression minimum dans la colonne d'échappement.

Il faut noter, toutefois, qu'une pareille comparaison ne sera valable que pour des mesures de la dépression et de la contre-pression faites sur la même machine, le température de la chaudière ayant, toutes choses égales d'ailleurs, une influence directe sur la valeur de la dépression existant dans la boîte à fumée.

#### VII. — RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE DE L'ÉCHAPPEMENT.

Contrairement aux indications précédentes qui conservent un certain caractère de relativité, on peut chercher à donner une idée plus exacte de la valeur absolue d'un système d'échappement en en calculant le rendement énergétique.

Ce rendement, égal au rapport entre l'énergie communiquée aux gaz aspirés et l'énergie utilisable dans la vapeur d'échappement par une détente jusqu'à la pression atmosphérique, a comme expression :

$$(13) \quad \eta = \frac{Sv \cdot h}{sV \cdot C_p} \quad (\text{même notation que précédemment})$$

Il suffit pour calculer ce rendement de relever la dépression  $h$  dans la boîte à fumée, la contrepression  $C_p$  dans la colonne d'échappement et de mesurer les volumes  $Sv$  des gaz aspirés et  $sV$  de la vapeur échappée pendant la même unité de temps.

Cette méthode, entièrement expérimentale, donne une sécurité complète au point de vue de l'exactitude des résultats.

Mais la mesure directe des volumes  $Sv$  et  $sV$  présente des difficultés pratiques assez sérieuses.

On peut alors se contenter d'évaluer le rendement par la formule (14)

$$(14) \quad \eta = \frac{T}{s} \left( \frac{h}{C_p} \right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{\gamma}}} \quad \text{(mêmes notations que précédemment)}$$

qui se déduit de la précédente (13) en y remplaçant  $Sv$  par  $T \sqrt{h}$  et  $V$  par  $\sqrt{2 \frac{C_p}{\gamma}}$  (suivant les formules (4) et (10) ci-dessus) ; mais ce mode de calcul exige la connaissance préalable du tempérament de la chaudière et du coefficient de contraction de la tuyère d'échappement,  $s$  étant la section minimum de la veine contractée à la sortie de la tuyère.

#### VIII. — CAUSES DE MOINDRE RENDEMENT DANS L'ÉCHAPPEMENT DES LOCOMOTIVES.

Trois causes viennent diminuer considérablement le rendement énergétique de l'échappement des locomotives, ce sont :

- 1° L'imperfection du mélange entre la vapeur et les gaz.
- 2° Les pertes de charge génératrices de remous et de tourbillonnements.
- 3° L'excès de force vive contenue dans les gaz évacués à l'atmosphère.

La plupart des modifications successives apportées aux échappements de locomotives ont eu pour objectif la réalisation d'un meilleur mélange entre la vapeur aspirante et les gaz aspirés.

Le nombre de dispositifs imaginés dans ce but est considérable et il est à noter que le moyen commun mis à contribution par la presque totalité des inventeurs pour atteindre ce résultat a été l'augmentation de la surface extérieure du jet de vapeur en contact avec les gaz de la boîte à fumée.

Il faut reconnaître que les efforts ainsi faits n'ont pas toujours été couronnés de succès.

Les expériences de Nozo et Geoffroy qui démontrèrent, dès 1863, l'équivalence entre un échappement unique et un échappement à tuyères et cheminées multiples de mêmes sections totales auraient cependant dû ruiner à jamais les espoirs que tant d'inventeurs ont mis depuis et semblent mettre toujours dans le principe de l'accroissement des surfaces de contact entre la vapeur et les gaz.

Si la solution des cheminées multiples a pu être reprise avec succès dans ces dernières années en Amérique, en Belgique par M. Legein (1925), et en France par la Compagnie d'Orléans (1927), ce n'est pas parce que l'on a augmenté la surface de frottement entre la vapeur et les gaz, mais parce que l'on a pu ainsi inscrire dans les limites du gabarit des appareils de tirage exigeant moins de hauteur pour qu'ils fonctionnent correctement.

On démontre en effet qu'un appareil à  $n$  cheminées n'exige pour son installation qu'une hauteur  $\sqrt{n}$  fois moindre que celle d'un appareil de section totale égale, mais à cheminée unique.



Une seule disposition semble avoir été imaginée dans le but de diminuer les pertes de charge subies par la vapeur et les gaz en traversant l'appareil de tirage, ce sont les ajutages intermédiaires que l'on interpose quelquefois (Petticoat des Américains) entre la tuyère et la cheminée.

Encore cette solution pourrait-elle bien n'avoir pas été imaginée en vue d'atteindre ce résultat, mais plutôt pour régulariser le tirage à travers les tubes en multipliant le nombre des points d'aspiration devant la plaque tubulaire.

Quoi qu'il en soit du but originellement poursuivi, l'emploi des ajutages intermédiaires permet de réduire dans des proportions importantes les pertes de charge subies par le courant de la vapeur et des gaz avant son évacuation à l'atmosphère.

L'application du théorème de Carnot-Borda permet de calculer ces pertes de charge et montre que, pour des conditions moyennes de marche, l'emploi d'un seul ajutage intermédiaire réduit ces pertes de charge d'environ 50 %; l'emploi des deux ajutages intermédiaires de 65 %, celui de trois ajutages de 75 %, celui de quatre de 80 %, etc...

Ces chiffres montrent l'efficacité d'un pareil dispositif dont l'intérêt prend naturellement en pratique une importance d'autant plus grande que l'appareil de tirage est plus étroitement dimensionné ou que la machine est plus poussée, toutes circonstances qui accroissent les vitesses d'écoulement des fluides et par suite la valeur absolue des pertes de charge, fonction du carré de ces vitesses.

En fait, le phénomène d'entraînement des gaz par la vapeur peut être d'une nature telle qu'il soit vain de chercher à en séparer, pour les étudier isolément, chacune des fonctions intégrantes.

Toutefois, dans les limites étroites où notre esprit peut avoir une vision exacte des choses, il semble bien que l'échappement idéal doive être celui où la fonction mélange aura pu s'accomplir le plus rapidement possible et en ne donnant lieu qu'au minimum de perte d'énergie dans le choc des veines qui s'affrontent.

Tout le problème consistera à donner aux différentes parties de l'échappement les meilleures formes pour qu'il en soit ainsi.

En ce qui concerne maintenant l'excès de force vive contenue dans les gaz et la vapeur au moment où ils sont rejetés à l'atmosphère, on pourra, pour la réduire, augmenter la section de la cheminée.

Toutefois, sauf dispositions spéciales prises à cet effet, on est limité dans cette voie pour d'autres raisons et par l'obligation d'éviter les rabattements de fumée qui gênent la visibilité et rendent difficile l'observation des signaux.

#### IX. — CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DE L'ÉCHAPPEMENT DES LOCOMOTIVES.

Malgré les études théoriques et les recherches expérimentales de savants et d'ingénieurs tels que Clarke, Zeuner, Nozo, Geoffroy, Prussmann, von Borries, Strahl, Boulvin, Rateau, Legein, Wagner, etc..., dont les noms, pour certains, ont déjà été cités plus haut, on doit reconnaître qu'on dispose souvent les échappements d'après des règles empiriques et parfois même au hasard.

Comme l'a montré M. Legein dans une étude nouvelle et remarquable de la question (1920) on peut cependant affirmer qu'il y a intérêt à soumettre au calcul la détermination des éléments de l'appareil de tirage des locomotives.

Proportionnés conformément aux lois de l'énergétique, les échappements ainsi établis seront plus voisins de la perfection que ne pourraient jamais l'être ceux dont les dimensions résulteraient de retouches empiriques en nombre même considérable.

L'expérience montre que la théorie peut conduire, ici comme ailleurs, à des règles d'établissement dont la sûreté contraste singulièrement avec les hésitations et les obscurités d'un empirisme malheureusement séduisant pour beaucoup, parce qu'ils le croient d'un maniement plus facile.

X. — RELATION ENTRE LA PUISSANCE DE VAPORISATION DE LA CHAUDIÈRE  
LA COURBE CARACTÉRISTIQUE DE L'ÉCHAPPEMENT ET LA SECTION DE LA TUYÈRE.

Pour une puissance de vaporisation  $W_1$  demandée à la chaudière de la locomotive, il faut brûler sur la grille une quantité de combustible  $C_1$  qui produit en même temps une quantité  $\varpi_1 C_1$  de gaz chauds à évacuer à l'atmosphère.

La quantité  $\varpi$  représente le poids des gaz chauds résultant de la combustion d'un kilo de charbon.

Soit  $h_1$  la dépression nécessaire dans la boîte à fumée pour aspirer ces gaz à travers la chaudière de tempérament  $T$ .

On aura (en conservant les notations antérieures) :

$$\frac{\varpi_1 C_1}{\delta} = T \sqrt{h_1}$$

d'où

$$h_1 = \left[ \frac{\varpi_1}{\delta} \times \frac{C_1}{T} \right]^2$$

La contrepression correspondante  $C_{p1}$  dans la colonne d'échappement déduite de la courbe caractéristique ( $\Gamma$ ) (Fig. 3) de l'échappement correspond elle-même à un certain débit de vapeur  $w_1$  à travers la tuyère.

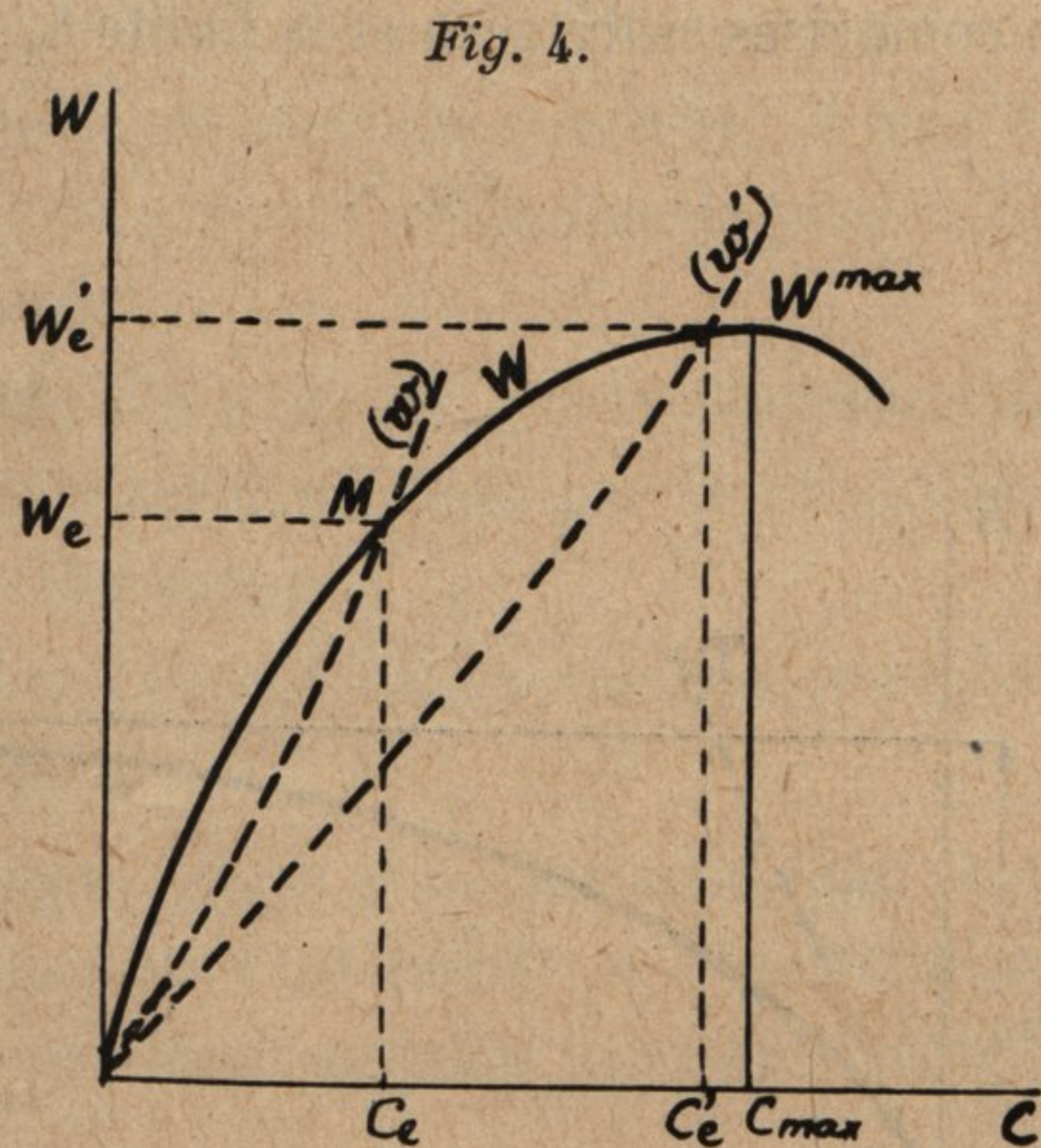
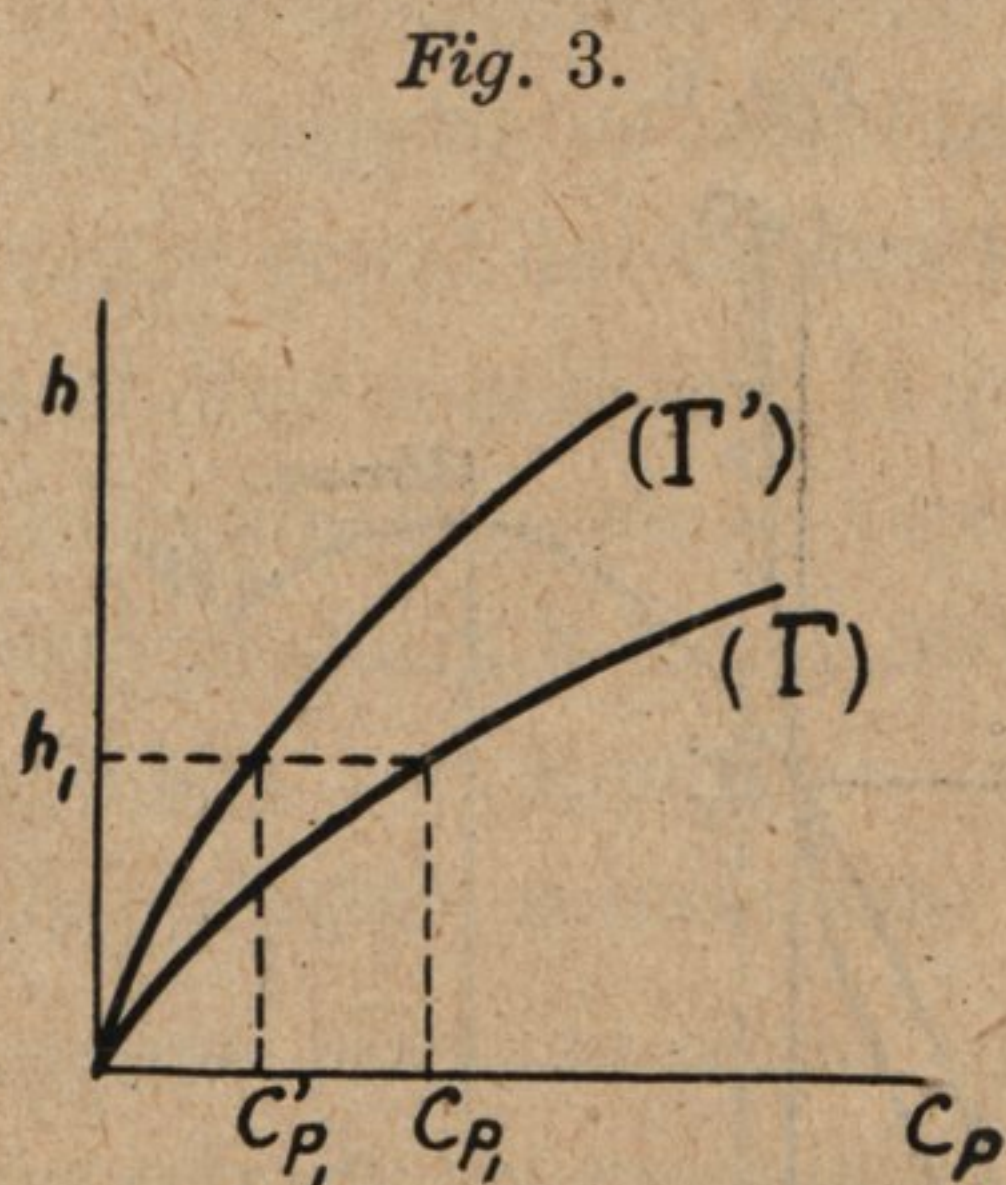
Ce débit est égal, suivant une formule déjà donnée plus haut, à :

$$w_1 = s \sqrt{\frac{2 C_{p1}}{\gamma}}$$

Si l'on porte sur un même graphique (Fig. 4) les quantités de vapeur  $w_1$  nécessaires pour produire le tirage à une allure donnée de la combustion et que l'on porte en même temps les quantités de vapeur  $W_1$  simultanément produites par la chaudière, on obtient deux courbes ( $W$ ) et ( $w$ ) qui se coupent en un point  $M$  auquel correspond une limite  $W_e$  imposée par l'échappement à la puissance de vaporisation de la chaudière.

Si, au lieu d'un échappement de courbe caractéristique ( $\Gamma$ ), on en avait eu un plus perfectionné de courbe ( $\Gamma'$ ) (Fig. 3), située au-dessus de la première, la ligne ( $w$ ) (Fig. 4) serait venue en ( $w'$ ) et la puissance de production de la chaudière limitée tout d'abord à la moitié environ de son maximum possible  $W_{\max}$ . aurait atteint une valeur  $W'_e$  voisine de ce maximum.

Cet exposé montre l'intérêt considérable des échappements perfectionnés si l'on veut utiliser complètement la puissance de vaporisation des chaudières.



Avec le premier échappement, on aurait peut-être pu atteindre aussi une production voisine de ce maximum, mais il aurait fallu pour cela diminuer la section  $s$  de la tuyère (puisque  $C_{p_1}' < C_{p_1}$ ) de telle manière que le produit :

$$s' \sqrt{C_{p_1}'}$$

devint égal au produit :

$$s \sqrt{C_{p_1}}$$

Cette diminution de section aurait encore augmenté indirectement la valeur  $C_{p_1}$  de la contrepression parce que, toutes choses égales d'ailleurs, le rendement énergétique d'un échappement diminue lorsque la vitesse de la vapeur et des gaz qui le traversent augmente.

Avec un échappement ordinaire, la puissance maximum de production de la chaudière n'aurait donc pu être atteinte que moyennant un accroissement peut-être considérable de la contrepression dans la colonne d'échappement.

On comprend aisément qu'une pareille augmentation de contrepression peut, dans certains cas, diminuer tellement la puissance développée sur les pistons de la machine que l'accroissement de la puissance de production de la chaudière obtenu à ce prix soit devenu tout à fait inutile.

XI. — SINGULARITÉS DANS LE FONCTIONNEMENT DE LA LOCOMOTIVE,

DUES A LA FORME PARTICULIÈRE DE LA COURBE CARACTÉRISTIQUE DE L'ÉCHAPPEMENT.

L'expérience montre que certaines locomotives vaporisent bien aux faibles puissances, mal aux grandes, et que d'autres, au contraire, vaporisant mal à puissance réduite, se mettent à vaporiser plus convenablement dès qu'on leur demande un plus grand effort.

Le premier cas se présente lorsque la courbe caractéristique de l'échappement  $(\Gamma_1)$  (Fig. 5) possède au voisinage de l'origine une courbure accentuée et devient rapidement asymptotique à une parallèle à l'axe des contrepressions d'ordonnée  $h_1$ .

Le graphique en  $(W,C)$  (Fig. 6) montre que l'équilibre entre la dépense de vapeur  $w_1$  nécessaire à la production du tirage et la quantité de vapeur correspondante  $W_1$  produite par unité de temps dans la chaudière est largement réalisé pour toutes les allures de la combustion comprises entre zéro et la limite  $C_1$ .

Fig. 5.

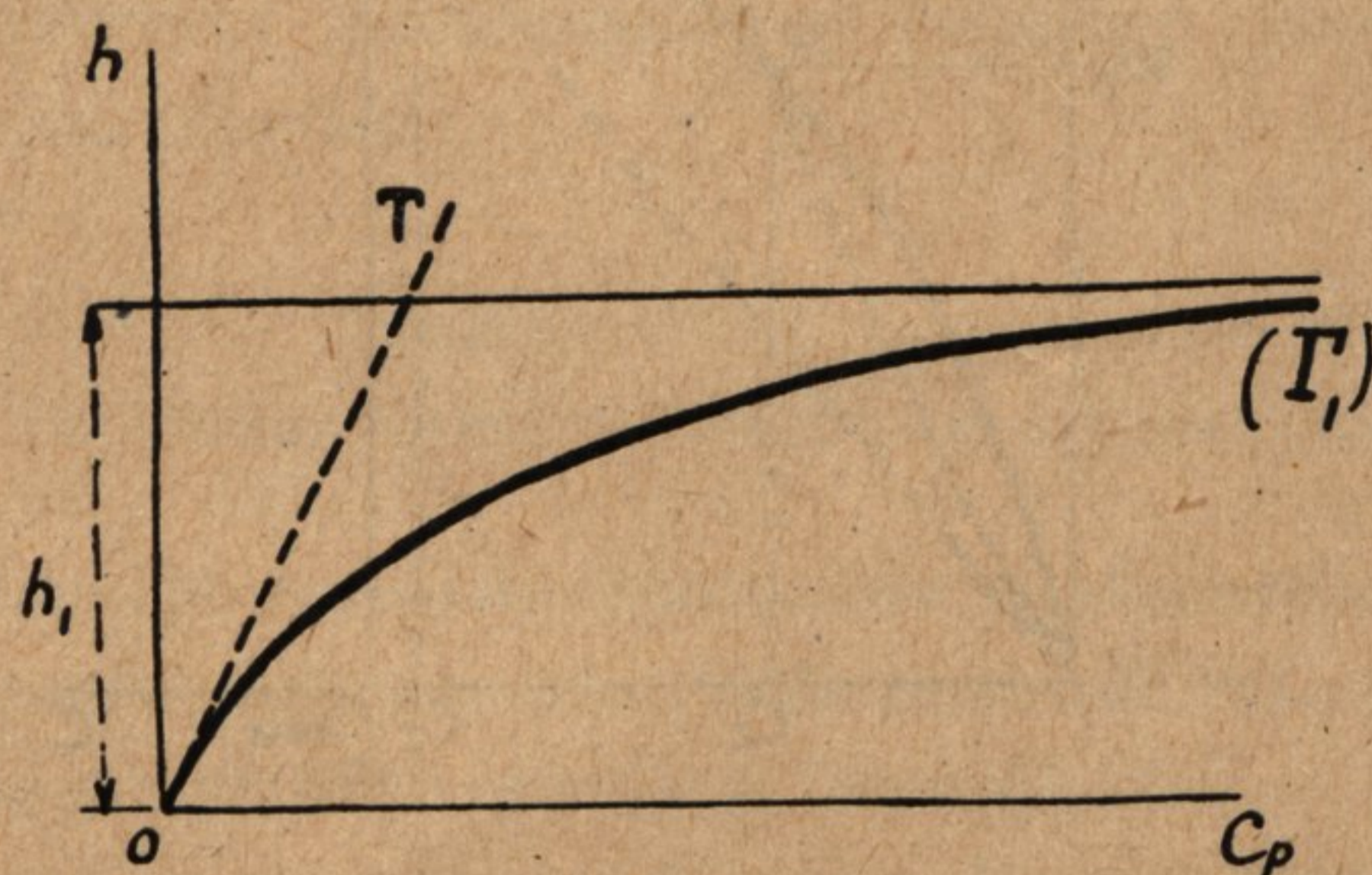
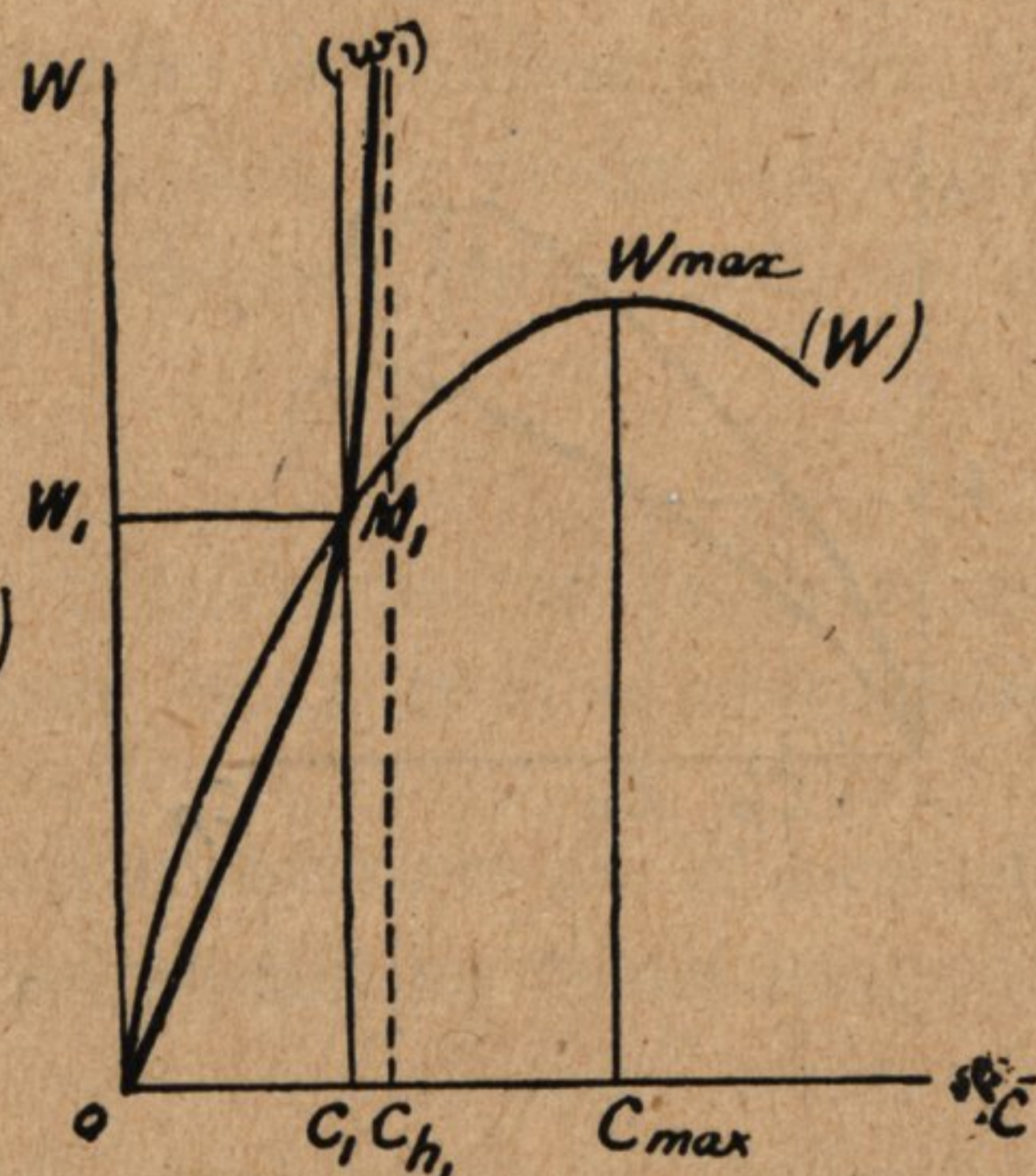


Fig. 6.



Mais cette limite  $C_1$  insuffisante pour utiliser convenablement toute la puissance de la chaudière rend la machine incapable de soutenir des efforts élevés par suite du manque de vaporisation.

Le second cas est celui d'un échappement dont la courbe caractéristique  $(\Gamma_2)$  (Fig. 7) au voisinage de l'origine est sensiblement confondue avec une ligne droite.

Le graphique en  $(W,C)$  (Fig. 8) montre alors que la courbe  $(w_2)$  coupe celle de la production de la chaudière  $(W)$  en deux points  $M_2$  et  $M'_2$ , l'un  $M'_2$  analogue à celui trouvé

Fig. 7.

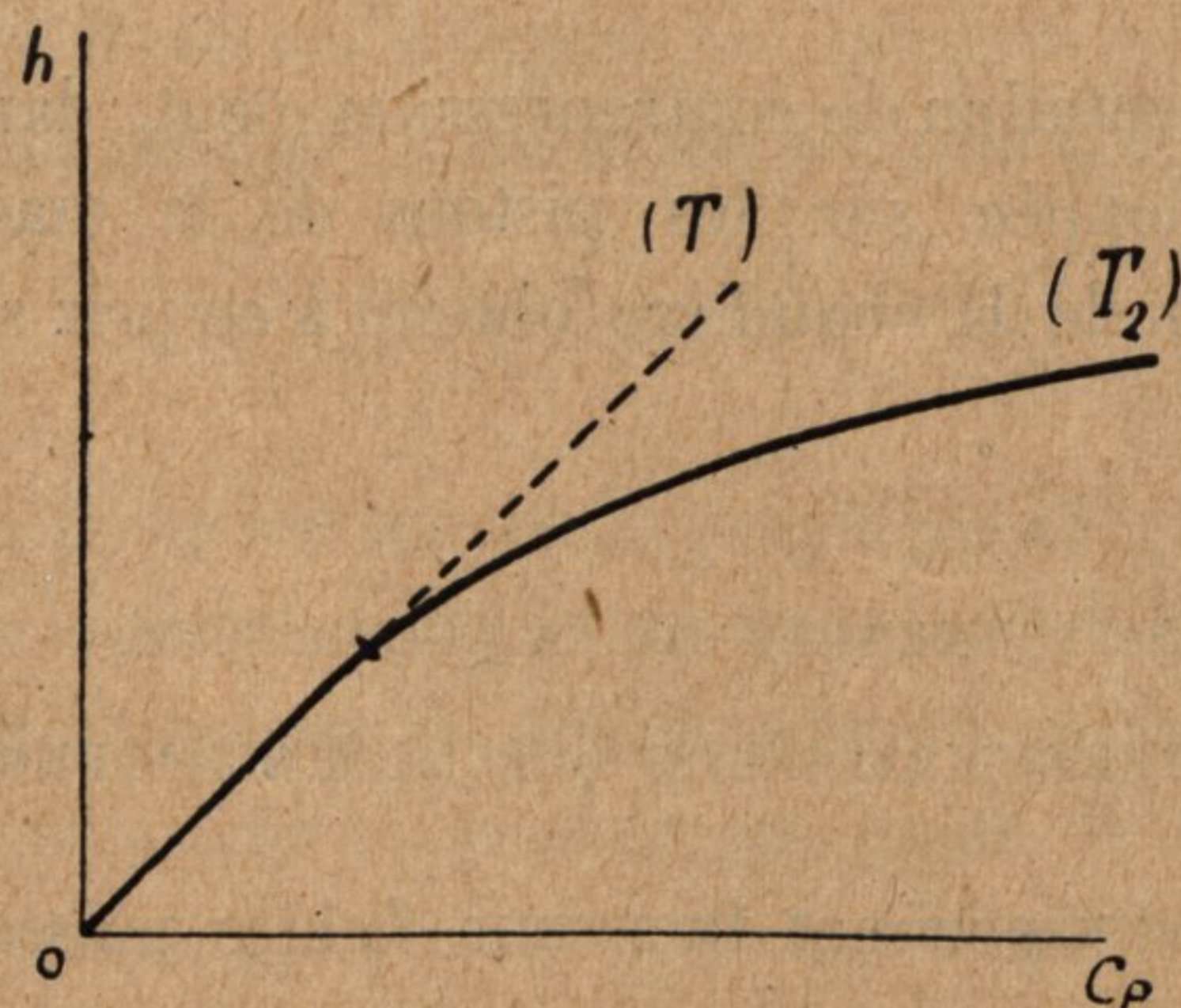
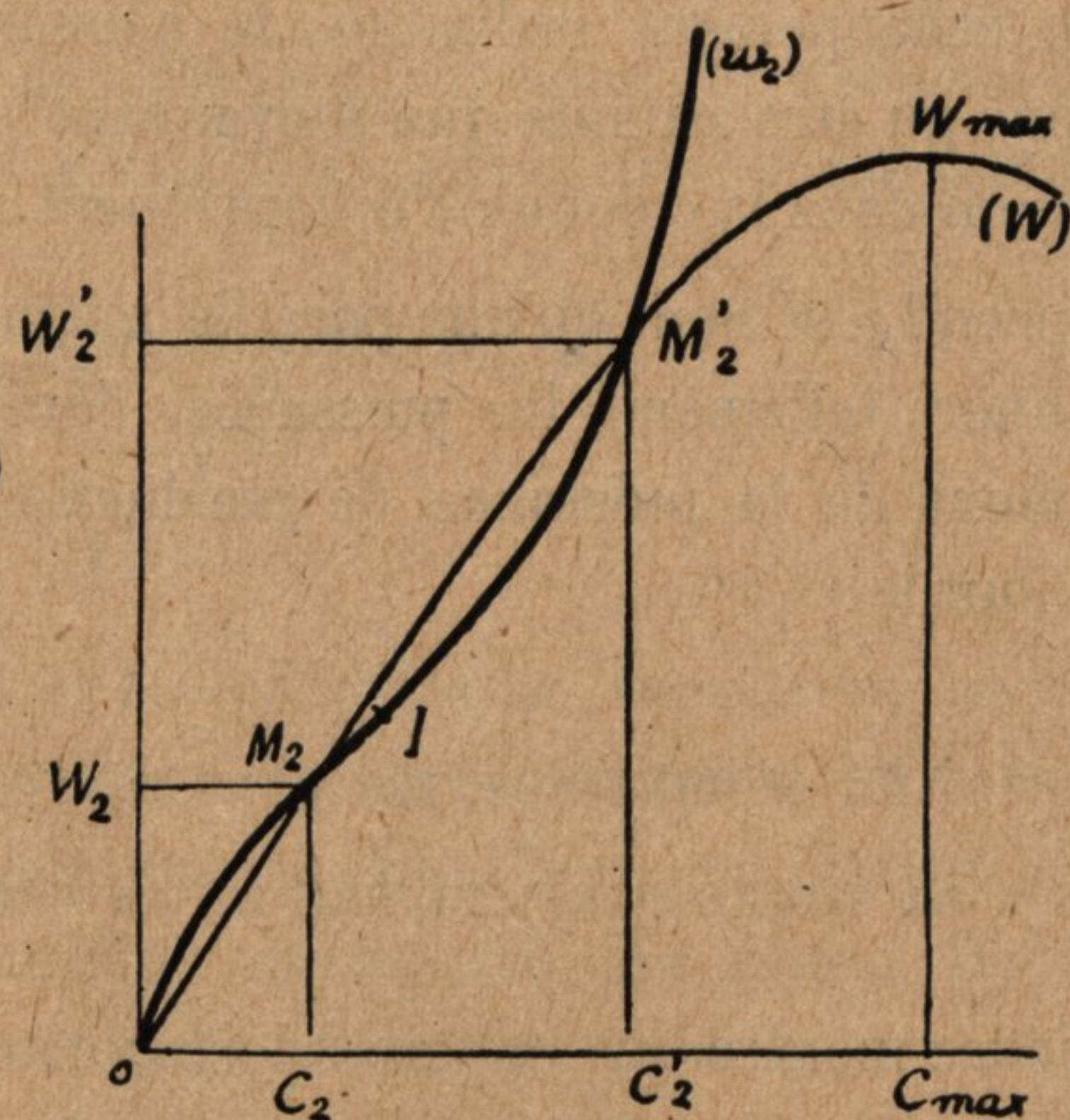


Fig. 8.



jusqu'ici dans les différents cas, l'autre  $M_2$  limitant la production de la chaudière aux faibles allures.

Le fonctionnement satisfaisant de la locomotive ne pourra ainsi avoir lieu qu'entre les points  $M_2$  et  $M'_2$ .

A priori, si l'on admet que le tempérément  $T$  de la chaudière est constant, la courbe  $(w_2)$  ne présente pas de point d'inflexion  $I$  ni ne coupe la courbe  $(W)$  en  $M_2$ , le cas envisagé ne devrait donc pas se produire.

En fait, si le tempérément même de la chaudière est bien une constante, il n'en est pas ainsi pour celui de la couche de combustible en ignition sur la grille dont la perméabilité décroît lorsque le tirage prend des valeurs voisines de zéro.

La quantité d'air appelé sous la grille diminue alors plus vite que la dépression dans la boîte à fumée si bien que le poids de vapeur fourni dans ces conditions par la chaudière n'est plus suffisant pour produire le tirage nécessaire à la combustion.

Ce phénomène sur lequel on ne saurait trop attirer l'attention peut être constaté avec certains échappements actuels dans deux cas typiques :

1° Lorsqu'une machine ayant son échappement réglé pour les conditions habituelles de marche d'un mécanicien qui lamine au régulateur, on veut ouvrir le régulateur en grand et détendre davantage la vapeur, par exemple, en marchant au point mort de la distribution ou à un cran voisin.

2° Lorsqu'on applique à une locomotive un réchauffeur d'eau d'alimentation par prélèvement de vapeur à l'échappement.

Dans le premier cas, si l'on augmente le degré de détente en utilisant, en outre, une plus haute pression on diminue généralement (machines compound et machines à surchauffe, en particulier) la quantité de vapeur consommée par cheval heure.

La dépense de vapeur ayant diminué de  $W$  à  $W'$  (Fig. 9), par exemple, le vecteur  $\overline{Mm}$ , qui mesure l'excès de vapeur passant à travers la tuyère d'échappement pour produire le tirage, a lui-même diminué et la vaporisation est devenue moins facile.

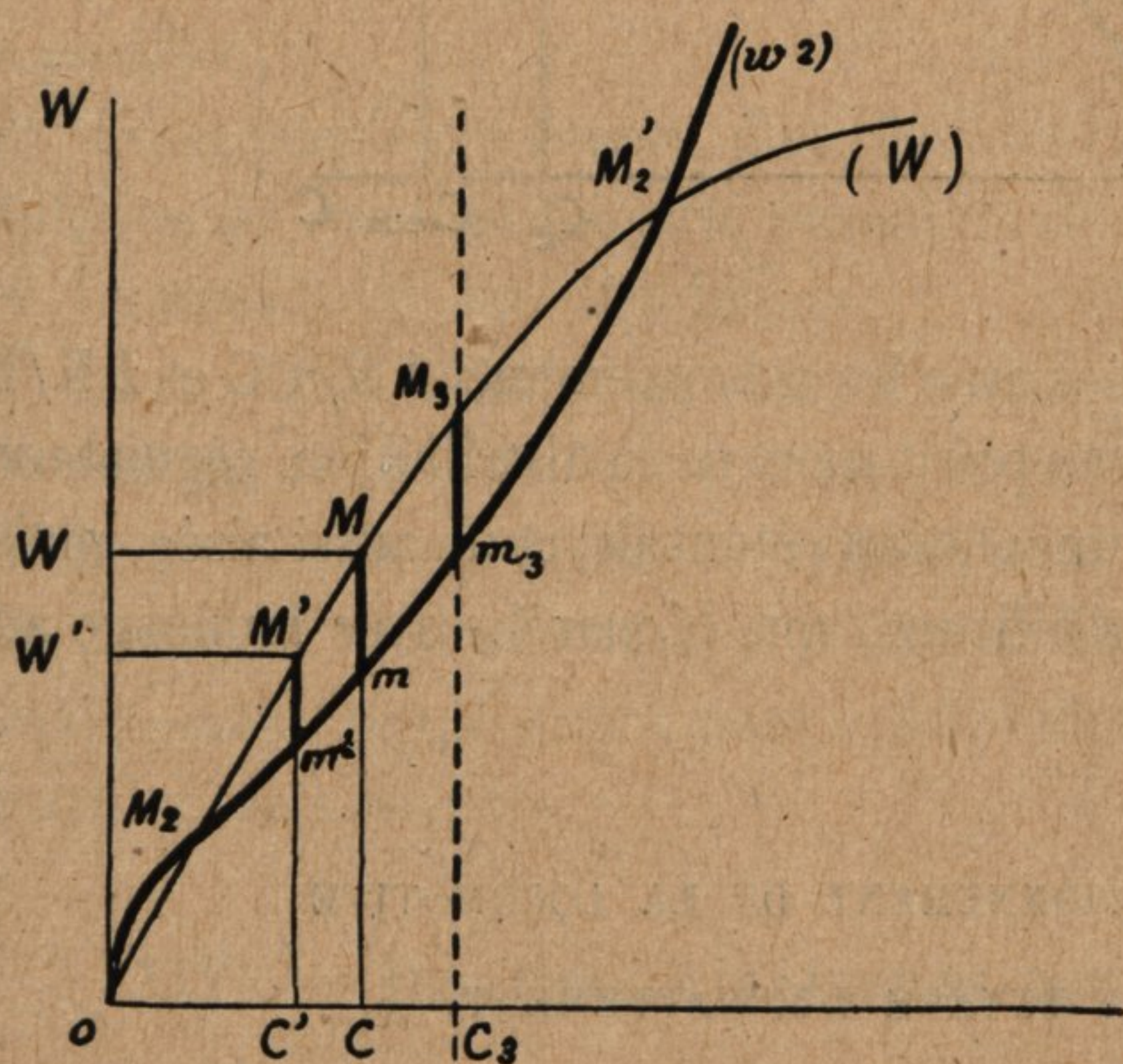
Si le point de fonctionnement de la machine avait été plus voisin de  $M_2$ , cas d'une faible puissance développée pouvant correspondre, par exemple, à celui de la marche au point mort de la distribution avec le régulateur ouvert en grand, l'effet signalé aurait pu être tellement sensible que le mode de marche en question n'eût pas été utilisable, l'alimentation de la chaudière étant devenue impossible.

Ces faits très graves qui, superficiellement examinés, pourraient justifier les habitudes souvent prises par le personnel des machines, de laminer

la vapeur au régulateur, ne sont dus qu'aux mauvaises dispositions de l'échappement ou à son degré de serrage insuffisant.

L'inspection de la figure 9 montre d'ailleurs que la situation défavorable que nous venons d'examiner serait exactement inversée si, au lieu de travailler à une puissance inférieure à celle correspondant au point  $M_3$  pour lequel le vecteur  $\overline{M_3 m_3}$  est maximum, la locomotive travaillait à une puissance inférieure.

Fig. 9.



Dans le cas où la machine a reçu un réchauffeur d'eau d'alimentation fonctionnant par prélèvement de vapeur à l'échappement, tous les phénomènes ci-dessus se reproduisent avec une amplitude peut-être même accrue, l'économie de vapeur réalisée pouvant atteindre des chiffres notables, de l'ordre de 10 à 20 % suivant les cas.

Pour remédier aux inconvénients que nous avons signalés, il faut ou bien se servir judicieusement de la possibilité de réduire la section de l'échappement, s'il est variable ; ou mieux disposer un échappement fixe de telle manière que sa courbe caractéristique ( $\Gamma$ ) (Fig. 10) possède près de l'origine une courbure suffisante pour supprimer le point d'intersection  $M_2$ , et, au delà, une partie aussi rectiligne que possible pour reculer le point  $M'_2$  jusqu'au voisinage immédiat du point  $W_{max}$  (Fig. 11) correspondant au maximum de puissance de production de la chaudière.

Fig. 10.

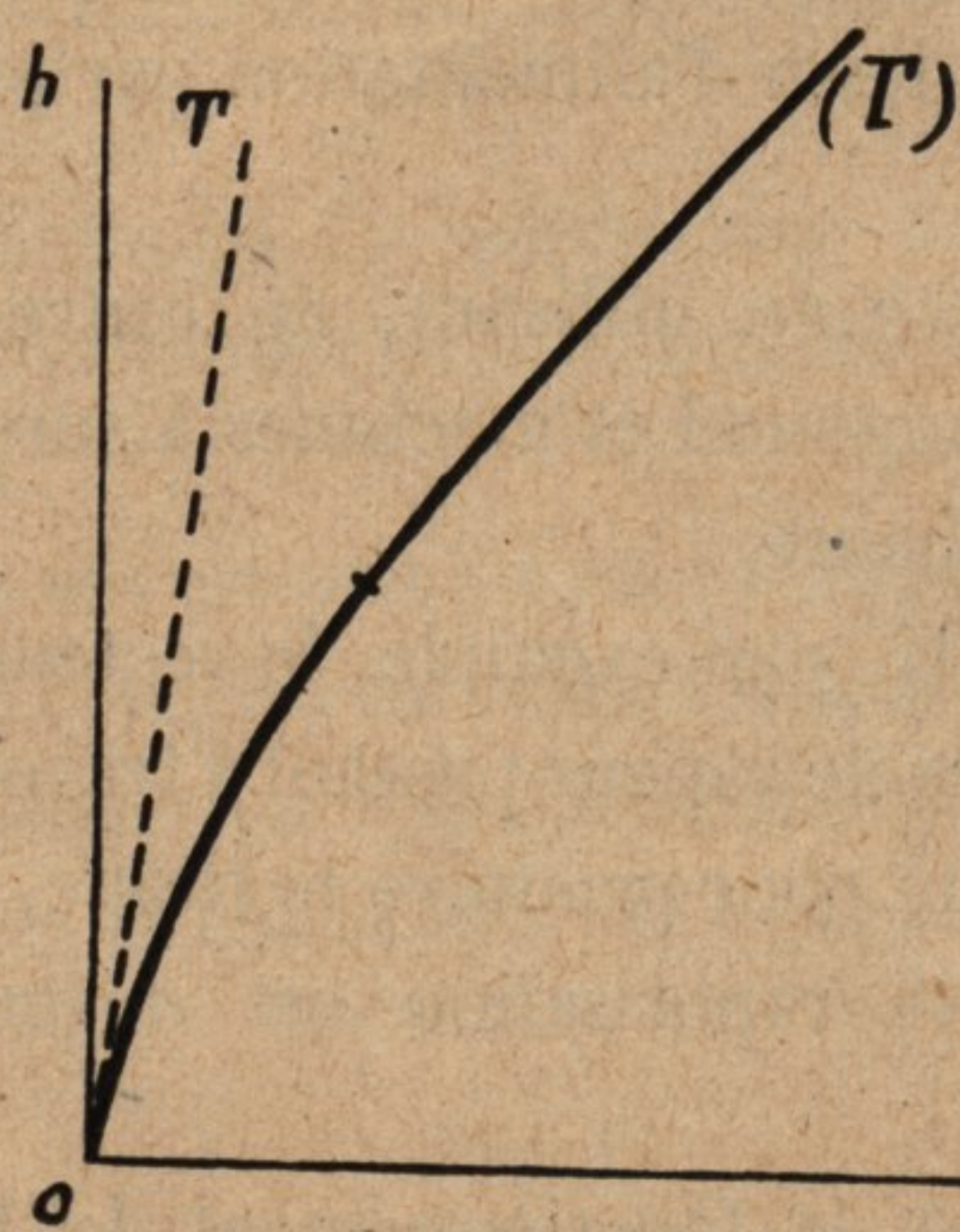
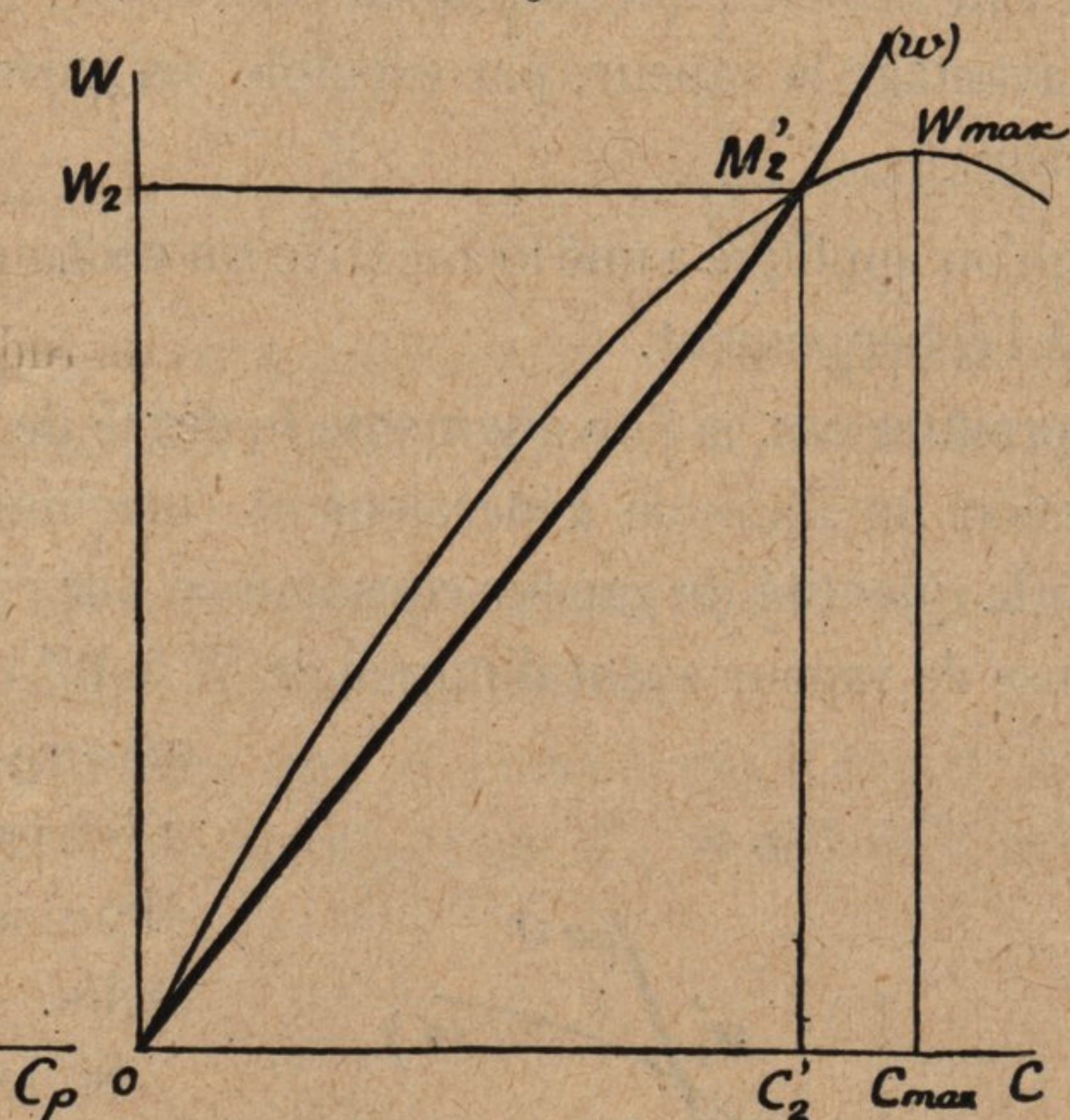


Fig. 11.



Ces conditions ont été approximativement réalisées avec les échappements 1 K/1 C et 1 K/T dont on trouvera la description plus loin ; la marche au point mort de la distribution, régulateur ouvert en grand, avec ou sans réchauffeur d'eau d'alimentation, étant devenue aussi aisée, mais nettement plus économique, toutes choses égales d'ailleurs, que la marche avec laminage au régulateur et admission prolongée.

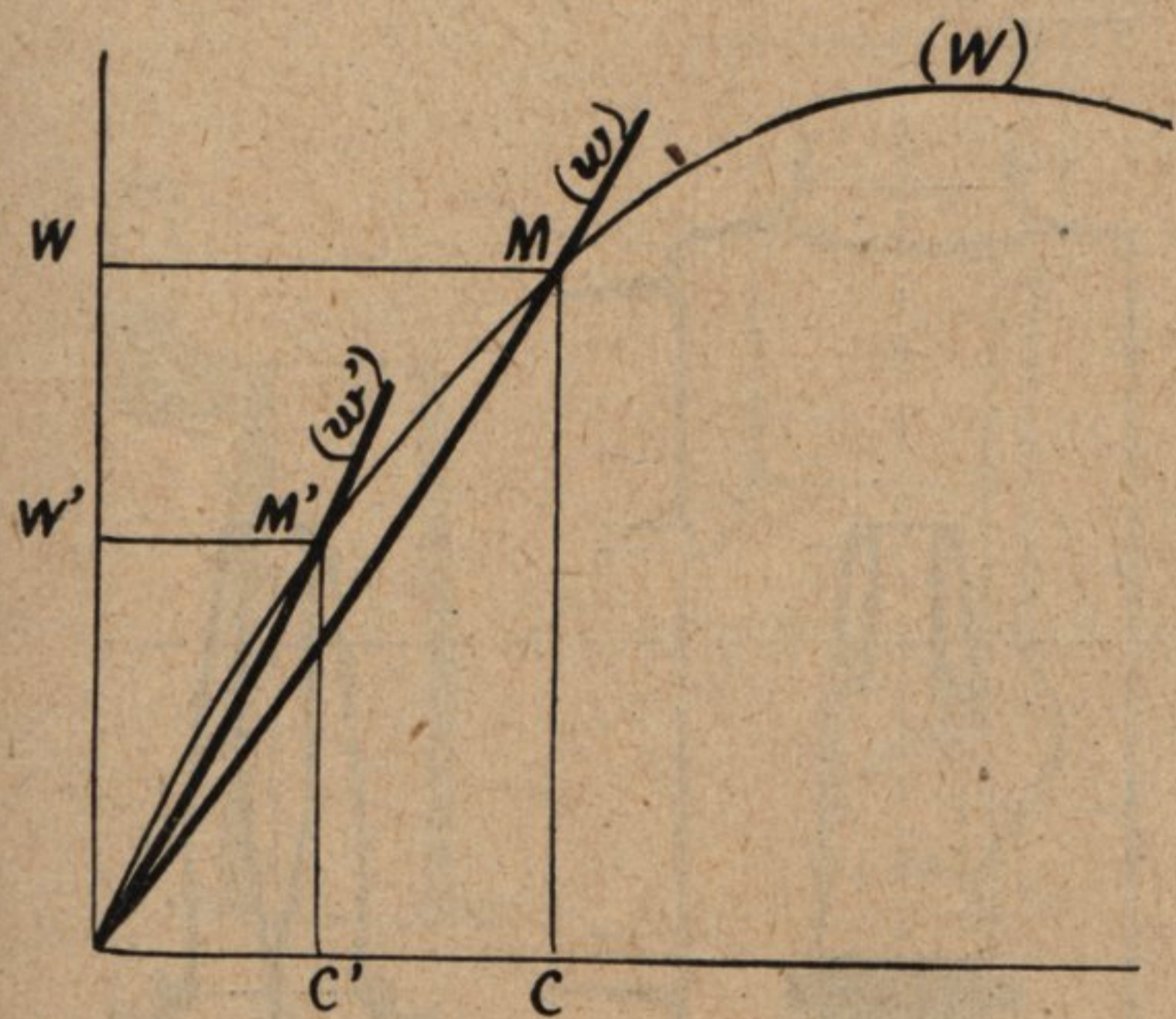
## XII. — SENSIBILITÉ EXTRÊME DU FONCTIONNEMENT DE LA LOCOMOTIVE AUX VARIATIONS DE SECTION DE LA TUYÈRE D'ÉCHAPPEMENT.

Comme nous venons de le voir, il est indispensable, pour que la locomotive fonctionne d'une manière satisfaisante, que le tirage obtenu par l'échappement suffise, dans toutes les conditions habituelles de marche, à produire la quantité de vapeur nécessaire au fonctionnement du moteur.

La forme des dernières courbes expérimentales ( $W$ ) et ( $w$ ) considérées ci-dessus montre bien, conformément aux conclusions théoriques énoncées au chapitre IV, qu'une tuyère de section donnée, convenablement réglée, convient pratiquement pour toutes les allures de marche. La

courbe ( $w$ ) reste en effet à très peu de distance de la courbe ( $W$ ) entre des limites extrêmement étendues de la production de vapeur. Il y a donc bien automaticité dans l'action du tirage.

Fig. 12.



Cette propriété remarquable de l'échappement des locomotives présente une contre-partie ; c'est l'extrême sensibilité de la puissance de vaporisation et par suite du fonctionnement général de la locomotive aux variations de section de la tuyère.

Supposons, en effet, qu'on augmente légèrement la section de cette tuyère, la courbe ( $w$ ) (Fig. 12) n'en sera que peu modifiée et passera en ( $w'$ ) par exemple, mais le point d'intersection  $M$  de cette courbe avec la courbe  $W$  sautera brusquement de  $M$  en  $M'$  et la puissance de production de la chaudière ainsi limitée du fait de l'échappement sera considérablement diminuée.

Ces remarques font voir qu'il est nécessaire de régler la section de la tuyère d'échappement avec la plus grande minutie et que l'on doit faire ce réglage par variations successives de faible amplitude.

### XIII. — QUALITÉS PRATIQUES D'UN BON ÉCHAPPEMENT.

Les qualités par lesquelles se distingue en pratique un bon échappement sont les suivantes :

1° Il doit donner, quelle que soit l'allure de marche imposée à la locomotive, un tirage toujours suffisant, mais sans excès, nécessaire à la réalisation d'une combustion aussi parfaite que possible ;

2° Il doit permettre l'usage d'un feu mince, plus économique qu'un feu épais parce que la distillation du combustible et la formation de l'oxyde de carbone sont ainsi mieux évitées ;

3° La fumivorité doit être bonne ;

4° La combustion doit être égale sur toute la surface de la grille ;

5° Les gaz chauds doivent être aspirés uniformément à travers tous les tubes du faisceau ;

6° Le poids des escarbilles entraînées dans la boîte à fumée doit être faible ;

7° Le tirage, même intense, doit être obtenu sans contrepression excessive dans la colonne d'échappement, ce qui aurait pour inconvénient de diminuer la puissance motrice et d'empêcher la machine de « courir ».

### XIV. — DES FORMES MULTIPLES DONNÉES A L'ÉCHAPPEMENT DES LOCOMOTIVES.

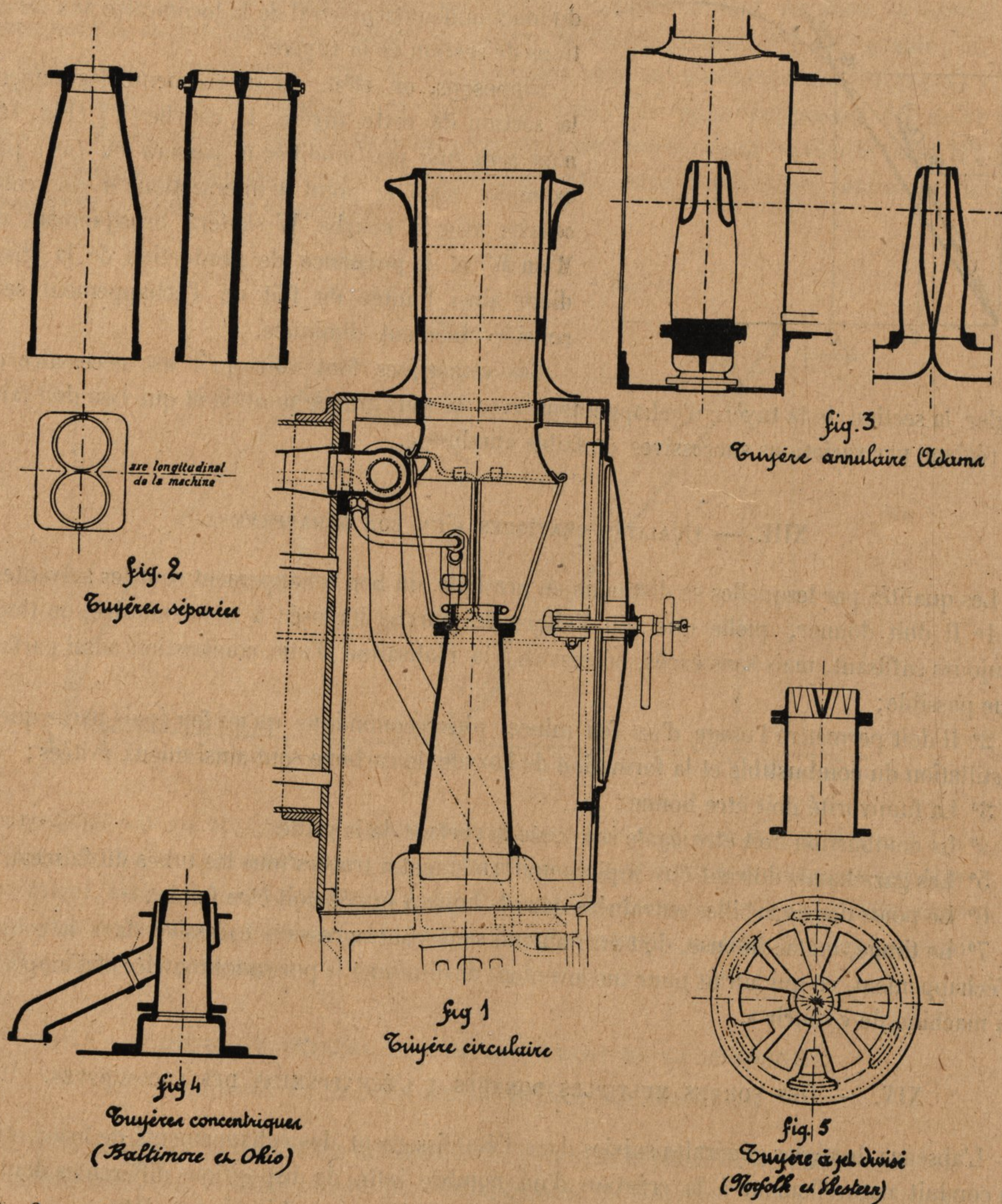
L'absence de règles générales suivies dans l'établissement des échappements de locomotives a conduit naturellement à la création d'un nombre infini de dispositions différentes dont les exemples des planches I, II et III ne donnent qu'une idée encore bien incomplète.

Ainsi, à côté de l'échappement fixe classique à tuyère circulaire (Pl. I, Fig. 1) on trouve par exemple l'échappement à tuyères séparées (une par cylindre) (Fig. 2).

La figure 3 représente l'échappement annulaire du type Adams où l'on a cherché, indépendamment de l'augmentation des surfaces de contact entre la vapeur et les gaz, à mieux

répartir le tirage sur toute l'étendue de la plaque tubulaire. Dans le système de la figure 4 on a fait échapper dans deux tuyères distinctes et concentriques la vapeur provenant de deux groupes de cylindres différents.

PLANCHE I.  
EXEMPLES D'ÉCHAPPEMENTS FIXES.



La figure 5 montre une disposition où l'on a réalisé une division particulièrement complexe du jet de vapeur d'échappement.

La planche II donne quelques exemples de tuyères variables.

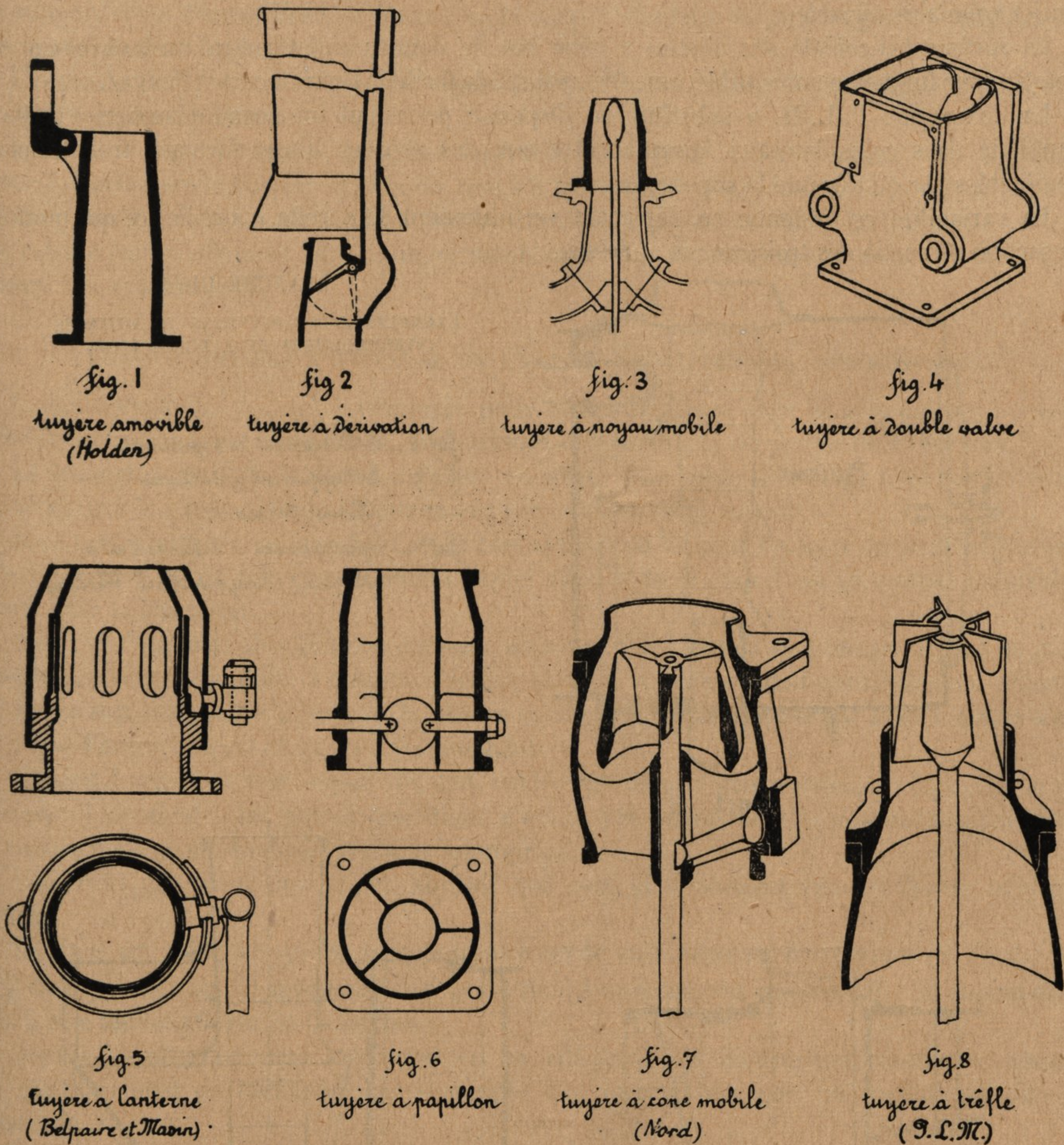
Leur diversité ne le cède en rien à celle des échappements fixes.

La figure 1 pl. II montre un échappement à deux tuyères dont l'une est amovible.



La figure 2 représente un dispositif où l'on peut dériver une partie de la vapeur d'échappement pour l'envoyer directement à l'atmosphère dans le but de réduire momentanément le tirage.

PLANCHE II.  
EXEMPLES D'ÉCHAPPEMENTS VARIABLES.



La tuyère à noyau central (Fig. 3) permet de faire varier progressivement la section de passage de la vapeur en déplaçant ce noyau dans le sens vertical.

Figure 4 on voit l'échappement à double valve qui a été très employé en France (de 1840 à 1905) et avec lequel la variabilité est obtenue en rapprochant ou éloignant les bords supérieurs de deux valves animées de mouvements symétriques de pivotement.

La figure 5 montre une tuyère à lanterne, la section de passage de la vapeur dépendant de la position relative d'une partie fixe et d'une partie mobile, toutes les deux percées d'orifices que l'on peut amener plus ou moins complètement en regard les uns des autres.

Dans la figure 6 la variabilité est obtenue en manœuvrant un registre à papillon placé dans une petite cheminée centrale concentrique à l'axe de la tuyère.

L'échappement de la figure 7, imaginé aux Chemins de fer du Nord français, a reçu un grand nombre d'applications (1905). On y règle le débit de vapeur en déplaçant verticalement un cône creux muni d'ailettes intérieures à surfaces hélicoïdales. On obtient ainsi un jet central fixe et un jet annulaire variable.

La surface hélicoïdale des ailettes a pour but de donner au jet central un mouvement de rotation sur lui-même susceptible, une fois réalisé, de faciliter l'entraînement des gaz.

La Compagnie P.-L.-M. a substitué au dispositif précédent un noyau dénommé « trèfle » muni de trois coins latéraux laissant entre eux des espaces libres formant trois canaux semblables par où s'écoule la vapeur.

La variabilité est obtenue en déplaçant verticalement le « trèfle » mobile, ce qui modifie la section de sortie des trois canaux ci-dessus.

PLANCHE III.

EXEMPLES D'ÉCHAPPEMENTS A AJUTAGES INTERMÉDIAIRES ET A DÉFLECTEUR.

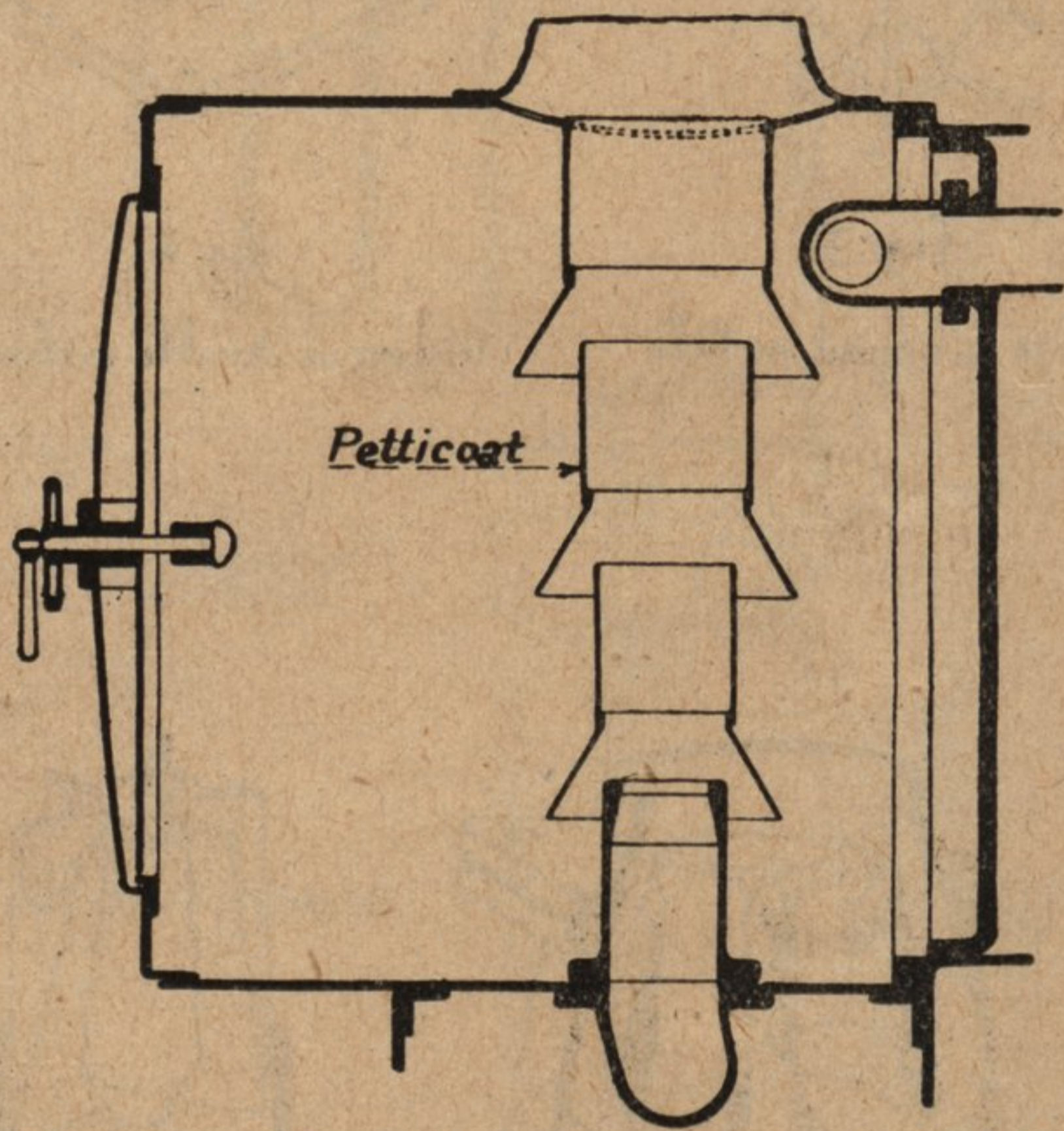


fig. 1

fig. 1 - Échappement à 3 petticoats

fig. 2 - Échappement à déflecteur  
(Pennsylvania R<sup>e</sup>)

fig. 3 - Échappement à déflecteur et à  
petticoat (Chicago et North Western)

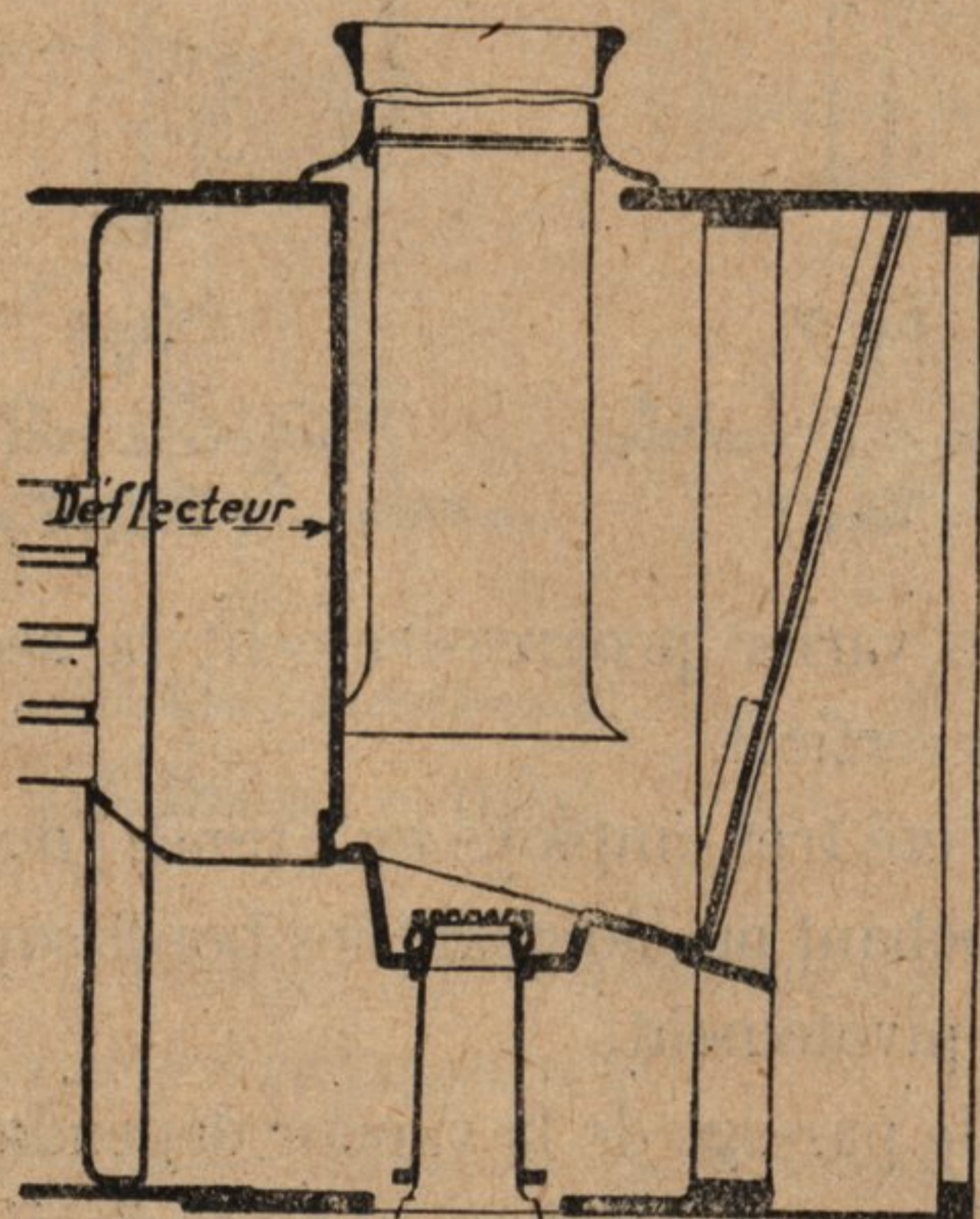


fig. 2

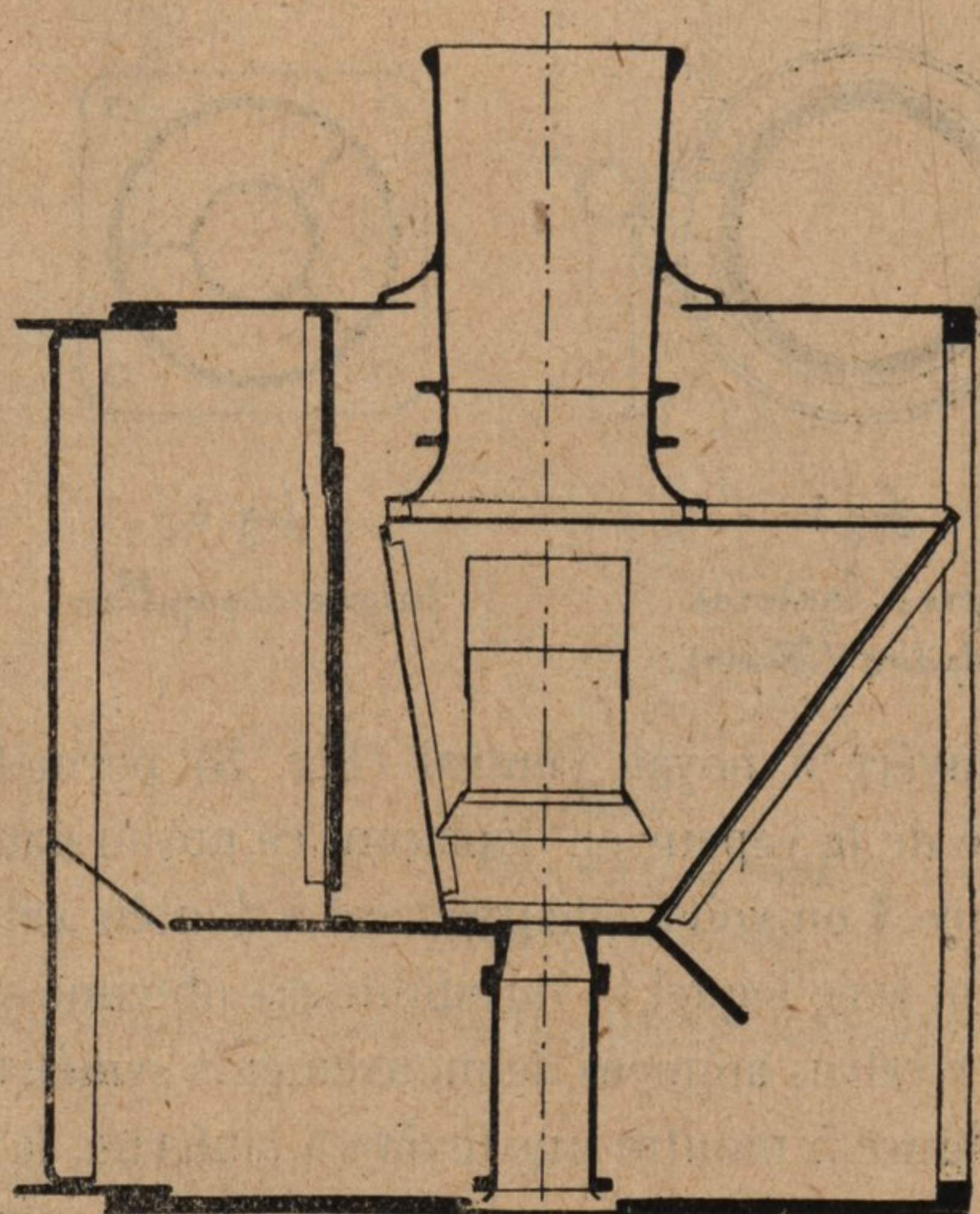


fig. 3

Enfin, la planche III donne un exemple d'échappement à ajutages intermédiaires (Petticoat) (Fig. 1), un exemple d'échappement à déflecteur (Fig. 2) et enfin un exemple d'échappement où le Petticoat et le déflecteur ont été employés simultanément.

Le Petticoat, comme nous l'avons dit plus haut, semble avoir généralement été utilisé pour uniformiser l'aspiration des gaz à travers le faisceau tubulaire ; mais on lui a souvent préféré le déflecteur, sorte d'écran placé en travers de la plaque tubulaire forçant les gaz à mieux passer par les tubes des rangées inférieures.

L'exemple de la figure 3 montre cependant que l'on a conservé quelquefois le Petticoat malgré l'emploi du déflecteur.

En fait, indépendamment de l'effet favorable que peut avoir l'emploi des ajutages intermédiaires sur l'égalité répartition du tirage à travers les tubes, son intérêt principal semble résider, comme nous l'avons expliqué antérieurement, dans la possibilité qu'il donne lorsqu'il est calculé rationnellement, de diminuer notablement les pertes d'énergie dues aux chocs des veines qui se mélangent.

#### XV. — AVANTAGES A ATTENDRE DE L'EMPLOI D'ÉCHAPPEMENTS PERFECTIONNÉS.

La multiplicité des dispositifs employés pour assurer le tirage dans les locomotives montre, semble-t-il, avant toute autre chose, l'importance et la difficulté du problème à résoudre.

Le fonctionnement de la locomotive est, en effet, impossible si le tirage n'est pas suffisant pour assurer la production de vapeur exigée par la dépense du moteur.

Si ce tirage n'est obtenu que pour les faibles allures, on ne peut soutenir de marches forcées que pendant le temps très court pendant lequel s'épuise la réserve d'eau accumulée préalablement dans la chaudière.

Il ne suffit pas non plus que l'on obtienne un tirage assez fort en tout temps ; il faut de plus que la contrepression dans la colonne d'échappement à laquelle on doit consentir pour obtenir ce tirage soit assez faible pour que la vitesse susceptible d'être atteinte par la locomotive n'en soit pas diminuée ; c'est ce qu'on a vu plus haut.

L'objectif principal vers lequel on doit tendre est dans le haut rendement énergétique de l'appareil de tirage, les autres conditions n'étant que subsidiaires et pouvant toujours être remplies moyennant quelques réglages appropriés.

Mais c'est justement devant cet objectif que sont généralement venus échouer tous les efforts.

En fait, un échappement de type courant possède un rendement énergétique de l'ordre de 6,7 ou 8%. Avec un échappement très perfectionné on atteignait jusqu'ici 10, 12 et peut-être 15% aux faibles allures de la machine.

Devant des résultats aussi médiocres on est allé jusqu'à préconiser tout récemment encore le remplacement de l'échappement si simple des locomotives par un turbo-ventilateur aspirant.

Comme nous l'avons déjà rappelé plus haut, le professeur Goss a essayé, en 1926, une disposition de ce genre dans laquelle la turbine actionnant le ventilateur était mue par la vapeur d'échappement. Le rendement énergétique fut considérablement plus élevé (24%) que celui obtenu (8%) sur la même machine avec son échappement ordinaire.

La diminution de contrepression à l'échappement fut de 57% aux puissances moyennes développées (tirage de 61 mm d'eau) et de 72% à pleine puissance (tirage de 305 mm).

Le seul inconvénient de ce système, suffisant d'ailleurs pour en écarter l'emploi sur une locomotive, est son manque complet de robustesse et son usure extrêmement rapide.

On verra dans la suite de cette note que les derniers perfectionnements apportés en partie

par M. Kylälä à l'échappement actuel des locomotives permettent, sans en changer la forme classique et sans rien perdre de sa robustesse ni de sa simplicité, d'obtenir des rendements énergétiques au moins égaux à ceux obtenus à l'aide d'un turbo-ventilateur.

Les avantages qui résultent de l'emploi d'un échappement perfectionné portent, d'une part, sur le fonctionnement du mécanisme moteur, d'autre part, sur le fonctionnement de la chaudière de la locomotive.

1° *Amélioration du fonctionnement du mécanisme moteur.* — A tirage égal obtenu dans la chaudière, un échappement perfectionné permet, grâce à la valeur élevée de son rendement énergétique de diminuer considérablement la contrepression dans la colonne d'échappement et par suite la contrepression sur les pistons.

Si cette diminution est par exemple de l'ordre de 60 à 70 %, l'expérience montre que l'augmentation de puissance sur les pistons pourra être, suivant les cas, de 5 à 12 %, avantage qui se retrouvera en économie de vapeur si l'on maintient constante la puissance développée en réduisant l'introduction.

2° *Amélioration du fonctionnement de la chaudière.* — Grâce à l'augmentation possible du tirage on peut : soit reculer la limite de production de la chaudière et par suite la puissance que peut soutenir la locomotive, soit améliorer les conditions de la combustion et par suite le rendement thermique de la chaudière.

La puissance que la locomotive pourra soutenir d'une manière continue augmentera ainsi de 15 à 25 % suivant les cas, parfois même davantage.

L'augmentation du rendement thermique de la chaudière pourra être de l'ordre de 5 à 15 % si l'on met à profit l'accroissement possible du tirage pour conduire le feu rationnellement et pour employer sans inconvénient, à cause de la résistance supplémentaire qu'elles opposent au passage des gaz, des voûtes en briques très développées, rayonnant fortement sur le combustible chargé sur la grille, élevant la température de combustion et brassant énergiquement les gaz, ce qui leur permet de finir de brûler avant qu'ils ne pénètrent dans les régions froides constituées par le faisceau tubulaire. Indépendamment du bon effet que peut avoir l'emploi d'une pareille voûte sur la façon dont s'opère la combustion dans le foyer, le rendement des surfaces de chauffe elles-mêmes s'en trouve accru :

1° Parce que la plus haute température effectivement communiquée aux gaz de la combustion, à quantité égale de calories transportées, facilite les échanges de chaleur.

2° Parce que le parcours plus long imposé à ces gaz dans le foyer les force à venir lécher a paroi arrière et le ciel de ce foyer abondamment ainsi plus de chaleur par convection.

Les avantages qui résultent de l'emploi d'échappements perfectionnés sont donc très importants et beaucoup plus qu'on ne serait généralement tenté de le croire a priori.

Une augmentation de la puissance du moteur de 5 à 12 % ou une économie de vapeur corrélative du même ordre ;

Un accroissement de la puissance de production de la chaudière et par suite de la puissance continue de la locomotive de 15 à 25 % ;

Une augmentation du rendement thermique de la chaudière (moyennant certaines précautions : voûtes en brique, feu mince) de 5 à 15 % ; sont des améliorations au moins comparables à celles qu'ont apportées les plus grands perfectionnements dont ait jusqu'ici bénéficié la locomotive à piston : le compoundage, la surchauffe et le réchauffage de l'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement.

Ces améliorations méritent, à ce titre et étant donnée la simplicité des appareils susceptibles de les procurer, qu'on leur accorde la plus grande attention.

(A Suivre).

---

# NOTE

SUR LES

## ÉCHAPPEMENTS DE LOCOMOTIVES

---

### RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

EFFECTUÉES A LA COMPAGNIE DE PARIS-ORLÉANS

**Par M. André CHAPELON,**

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES,  
INSPECTEUR DU MATÉRIEL A LA COMPAGNIE D'ORLÉANS.

---

(Suite) (1)

---

#### C. — NOUVEAUX ÉCHAPPEMENTS PERFECTIONNÉS

##### I. — HISTORIQUE.

Des perfectionnements nouveaux ont été apportés dans ces dernières années aux échappements de locomotives.

M. Kylälä a imaginé et appliqué vers 1919 (2) un ajustage intermédiaire de forme particulièrement bien étudiée, qui s'est révélé comme capable d'augmenter considérablement le rendement énergétique de l'appareil de tirage des locomotives.

En 1926, au cours d'expériences effectuées au Chemin de fer de Paris à Orléans, sous la direction de M. Billet, Ingénieur Principal du Matériel et de M. Garsonnin, Sous-Ingénieur du Matériel, dans le but de sélectionner les types d'échappement les plus efficaces, on s'efforça de rechercher les meilleures conditions d'établissement et d'emploi de ces nouveaux appareils et on aboutit à la conclusion que les ajustages Kylälä marquaient effectivement un progrès très net sur tous les dispositifs employés antérieurement et que, bien proportionnés et judicieusement combinés avec d'autres dispositifs (Petticoat, cheminée en forme de trompe,

---

(1) Voir le N° d'Août.

(2) Brevets Kylälä (1919).



tuyère à amorces de barrettes (1), ils permettaient d'établir des échappements d'un rendement énergétique qui ne semblait pas avoir encore été atteint.

## II. — PRINCIPES D'ÉTABLISSEMENT.

Les principes d'établissement utilisés dans ces nouveaux échappements répondent, aussi bien qu'il a été possible de le faire, aux desiderata déjà exprimés dans la première partie de cette note.

On a notamment cherché :

1° A réaliser aussi complètement et aussi rapidement que possible le mélange de la vapeur d'échappement et des gaz de la combustion, tout en réduisant à leur minimum les pertes de charge dues aux chocs des veines qui s'affrontent.

2° A expulser au dehors le mélange ainsi formé avec le minimum de dépense d'énergie (Petticoat, cheminée en forme de trompe).

3° A proportionner les différentes parties de l'appareil de tirage suivant les caractéristiques de la chaudière et en se conformant aux principes de la mécanique des fluides.

4° A obtenir une courbe caractéristique de l'échappement telle que la vaporisation de la chaudière s'adapte automatiquement à tous les modes de marche et à toutes les allures.

## III. — DESCRIPTION DES APPAREILS

Les nouveaux échappements perfectionnés ont été réalisés sous deux formes qui ont donné naissance aux deux types principaux suivants :

1° Le type 1 K/1 C comportant l'emploi d'un ajutage Kylälä K (Fig. 13) et d'un ajutage cylindrique C (Petticoat) interposés à la suite l'un de l'autre entre la tuyère d'échappement *t* et la cheminée.

2° Le type 1 K/T, analogue au précédent, mais où l'ensemble formé par la cheminée et l'ajutage cylindrique a été remplacé par une trompe T, (Fig. 15) de forme et de dimensions telles qu'un vide notable puisse s'établir au col de cette trompe.

La tuyère d'échappement employée dans les deux cas est fixe *t* (Fig. 13 et 15) ou variable (Fig. 17). Elle comporte l'emploi d'amorces de barrettes C (Fig. 17). Cette tuyère et ces barrettes ont des formes telles que les pertes de charge qu'elles provoquent soient réduites au minimum.

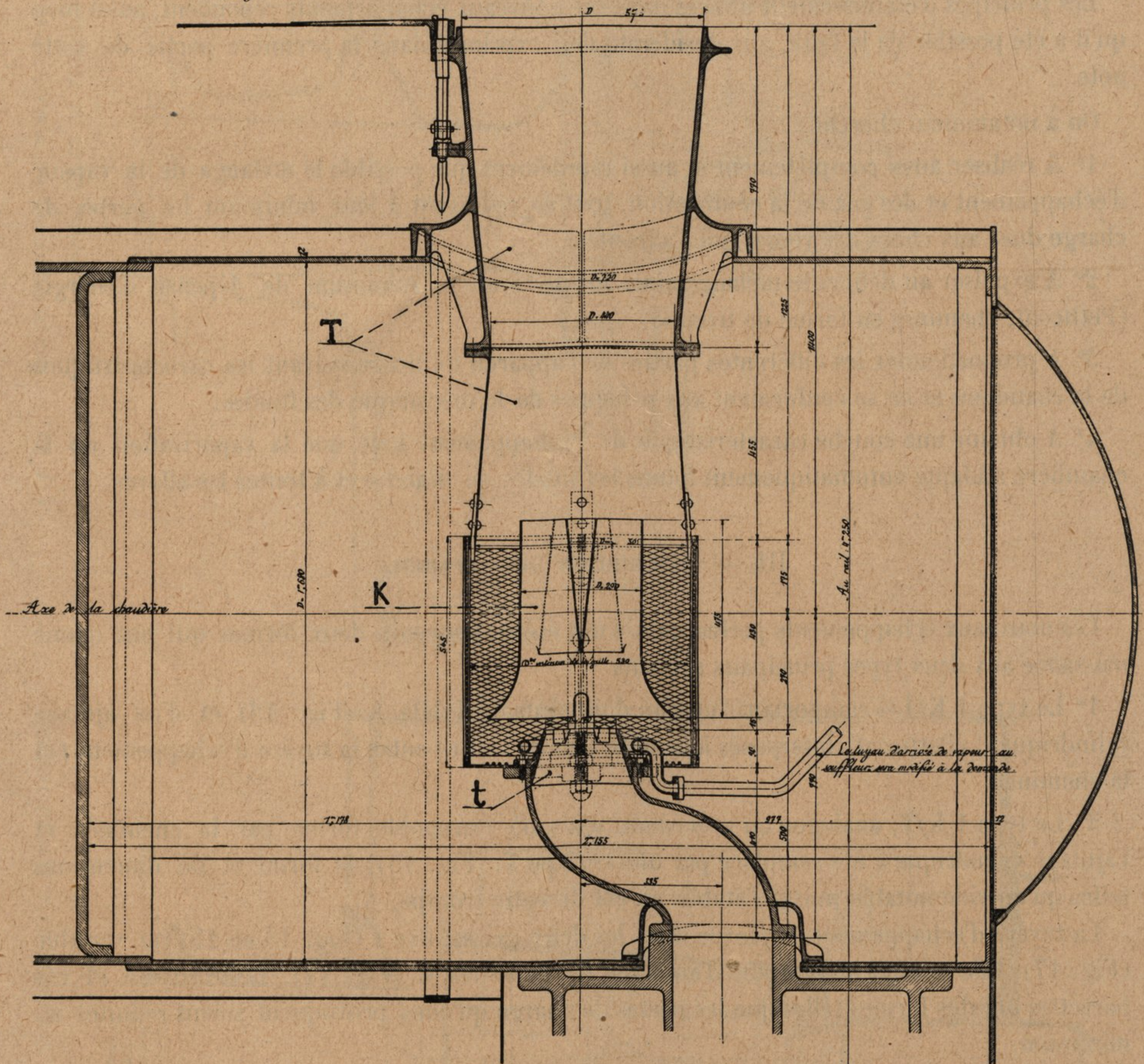
La variabilité, lorsqu'on la désire, est obtenue très simplement en montant les barrettes sur un dispositif mobile (Fig. 17) permettant d'en modifier la position par rapport au plan de sortie de la tuyère (2). Ce dispositif est en outre étudié pour réduire à leur plus simple expression les obstacles placés dans le courant de la vapeur d'échappement. Les barrettes sont fixées sur des plaques métalliques 3 solidaires d'une pièce 4 montée à coulissement dans un manchon 5 et combinées avec un levier de commande 6 placé dans le plan et au-dessous de l'une des pièces 3. Ce levier 6 est actionné de l'extérieur par un arbre 7.

---

(1 et 2) Brevets Chapelon (1926-28).

La figure 18 donne l'élévation, la coupe et la perspective d'un ajutage Kylälä.  
 Les figures 19 et 20 en donnent des vues photographiques.  
 Cet ajutage se divise en quatre buses (1) (Fig. 18) par où le flux gazeux sort en jets divergents par rapport à l'axe général de l'appareil de tirage.

Fig. 15. — ÉCHAPPEMENT 1 K/T MONTÉ SUR UNE LOCOMOTIVE PACIFIC



Ces buses sont en outre disposées de telle façon que les gaz de la combustion puissent pénétrer facilement entre elles, ce qui aide au mélange des gaz aspirants et des gaz aspirés.

La figure 21 montre les amorces de barrettes placées dans la tuyère d'échappement.

La figure 13 donne la coupe d'un échappement 1 K/1 C appliqué à une locomotive Mikado tender à simple expansion, deux cylindres et surchauffe.

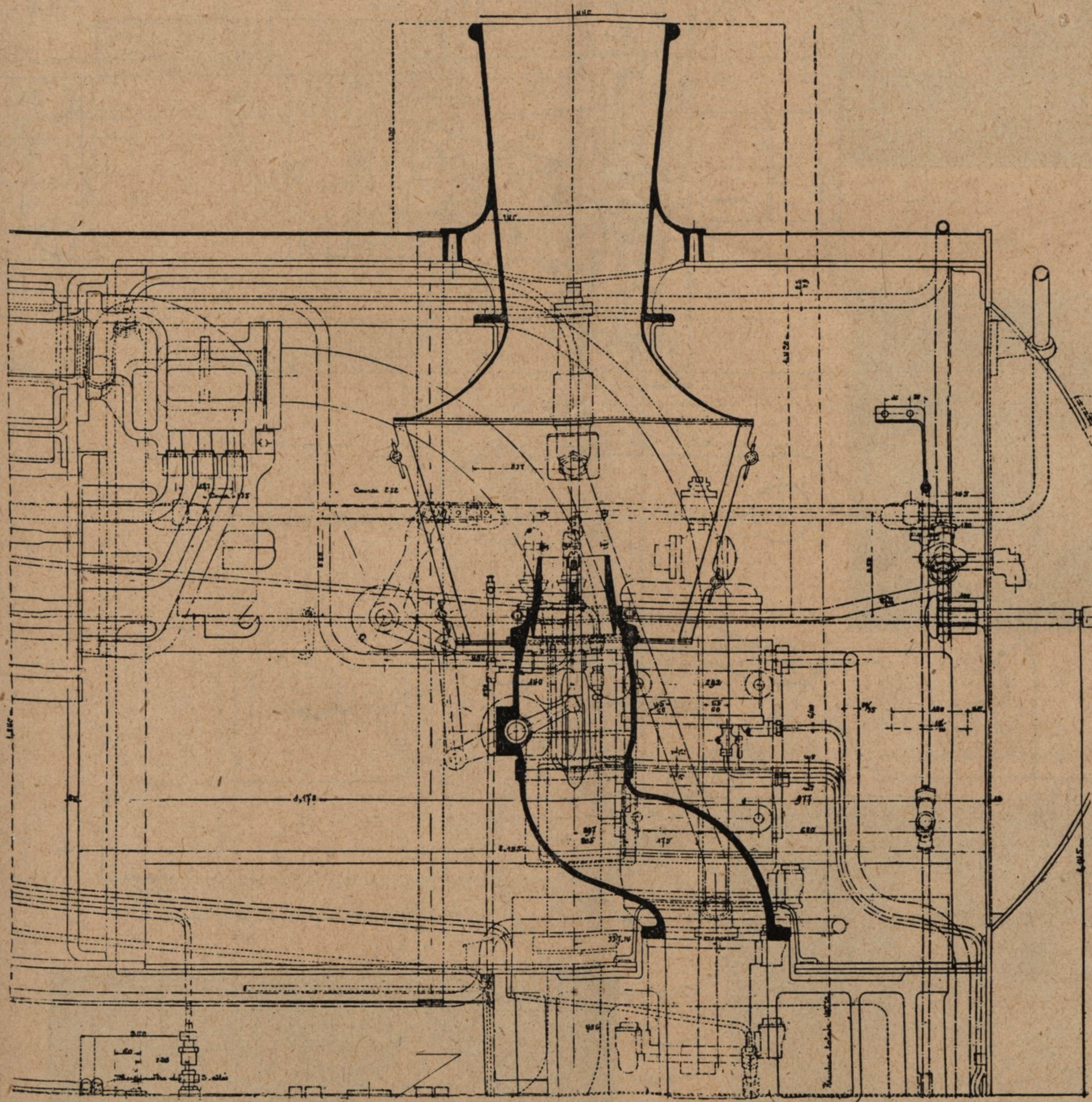
La vapeur sortant de la tuyère *t* munie de quatre amorces de barrettes aspire une partie des gaz de la combustion. Le premier mélange ainsi formé pénètre dans l'ajutage Kylälä K (1)

(1) L'ajutage Kylälä est orienté de telle façon que ses cloisons soient à l'aplomb des amorces de barrettes de la tuyère.



placé immédiatement au-dessus de la tuyère et en sort sous la forme de quatre jets divergents animés de grandes vitesses. Ces quatre jets entraînent à leur tour la plus grande partie du reste des gaz de la combustion et pénètrent dans l'ajutage cylindrique C puis dans la cheminée par où se fait l'évacuation à l'atmosphère.

Fig. 16. — ÉCHAPPEMENT A CÔNE MOBILE MONTÉ ANTÉRIEUREMENT SUR LA MACHINE PACIFIC DE LA FIGURE 15.



La figure 14 montre l'échappement à cône mobile appliqué antérieurement à la même machine.

La figure 15 donne la coupe d'un échappement 1 K/T appliqué à une locomotive Pacific compound quatre cylindres et surchauffe.

Tout se passe d'abord comme dans le cas de l'échappement 1 K/1 C mais, à la sortie de l'ajutage Kylälä, le premier mélange pénètre avec le reste des gaz de la combustion dans une trompe T, dans laquelle s'effectue d'abord le second mélange, puis l'évacuation à l'atmosphère.

Fig. 17. — ÉCHAPPEMENT VARIABLE A AMORCES DE BARBETTES (représenté serré à fond).

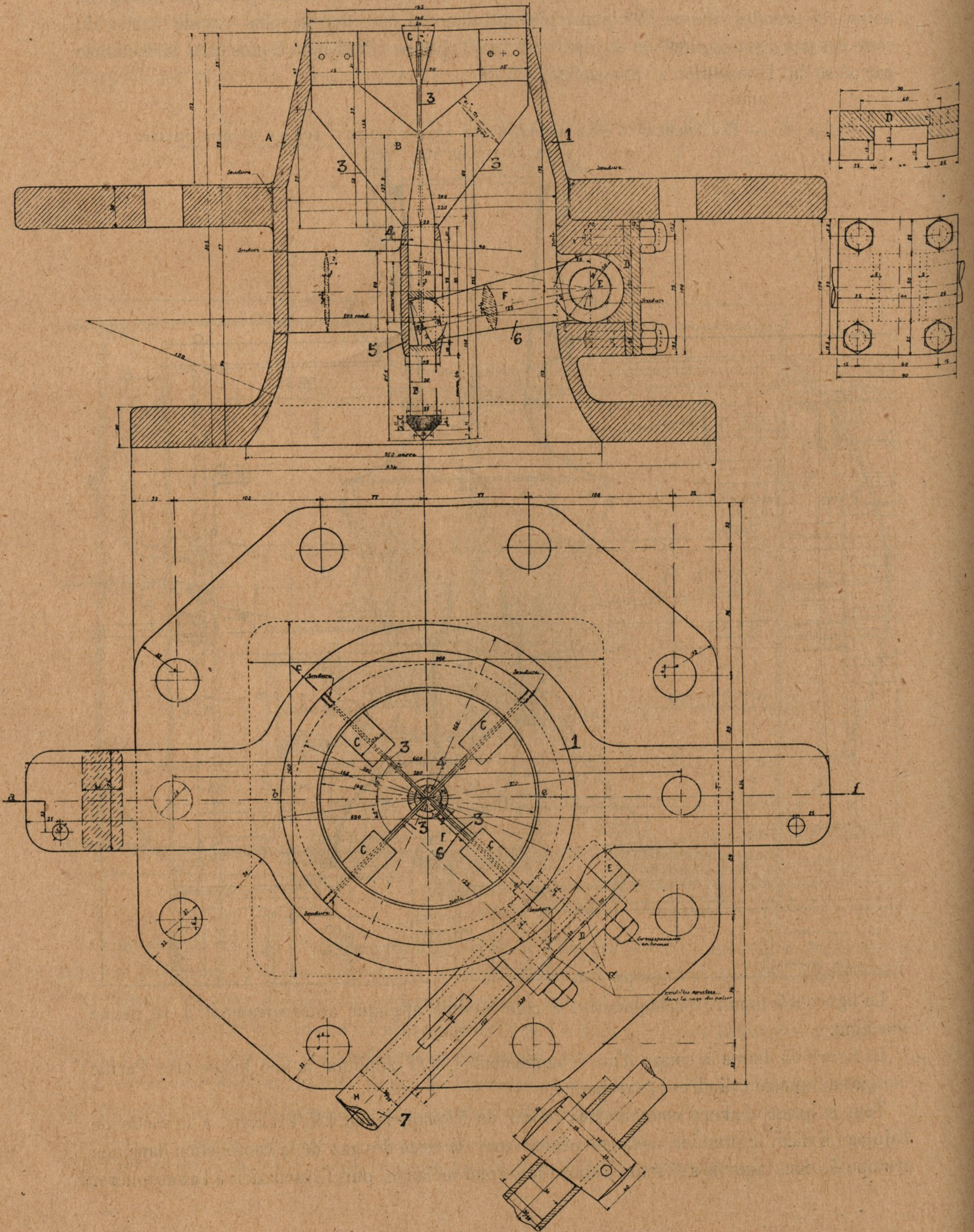
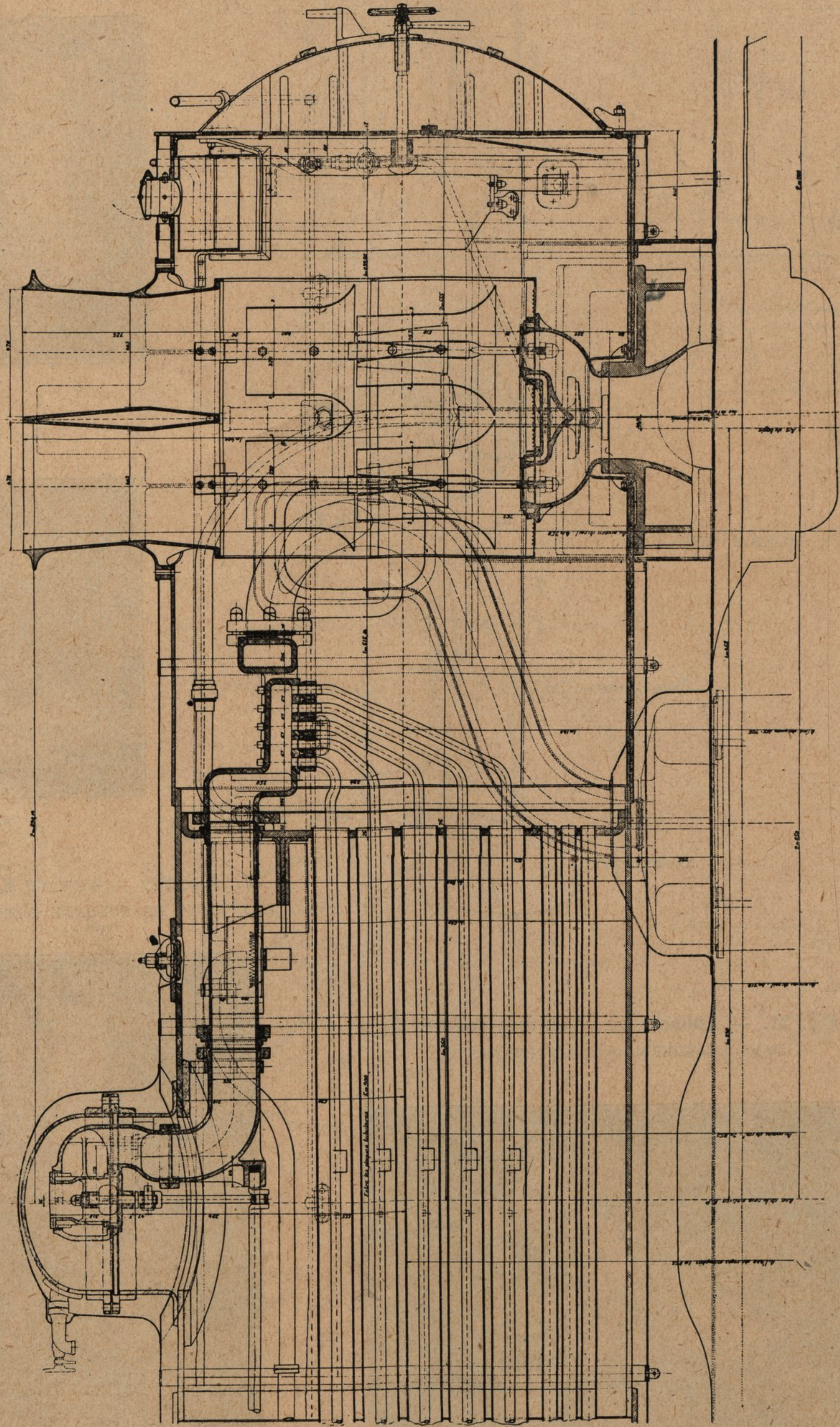


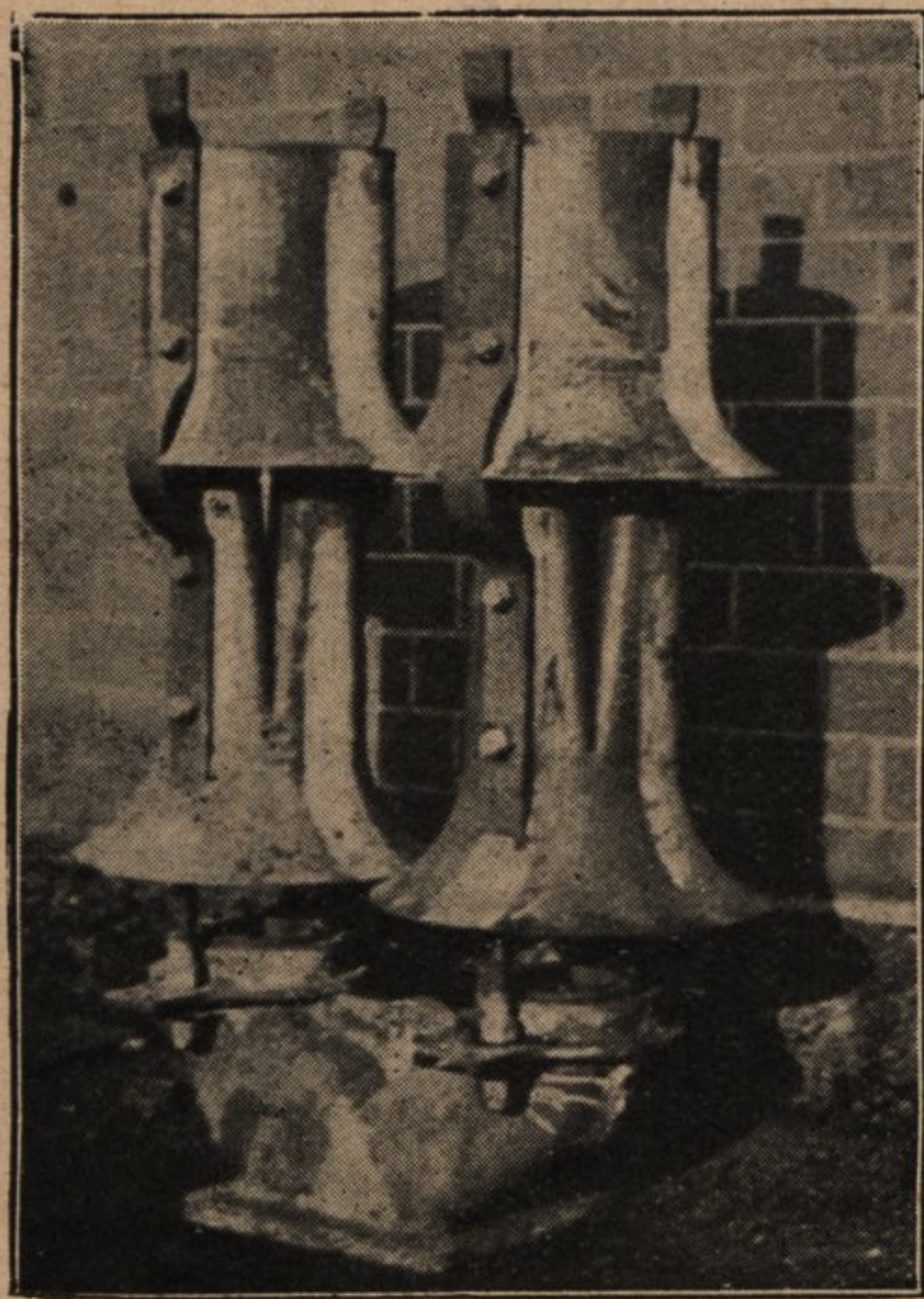


Fig. 23. — ÉCHAPPEMENT 1 K/1 C DOUBLE MONTÉ SUR UNE LOCOMOTIVE PACIFIC.



La figure 16 montre l'échappement à cône mobile appliqué antérieurement à la même machine.

Fig. 24.



La figure 22 donne la vue photographique de l'ajutage Kylälä, monté sur la colonne d'échappement de cette machine.

Enfin la figure 23 donne la coupe d'un échappement double du type 1 K/1 C (1 K/1 C — 1 K/1 C), appliqué à une locomotive Pacific Compound à quatre cylindres et à haute surchauffe.

La figure 24 donne une photographie de l'ensemble des ajutages et de la colonne d'échappement.

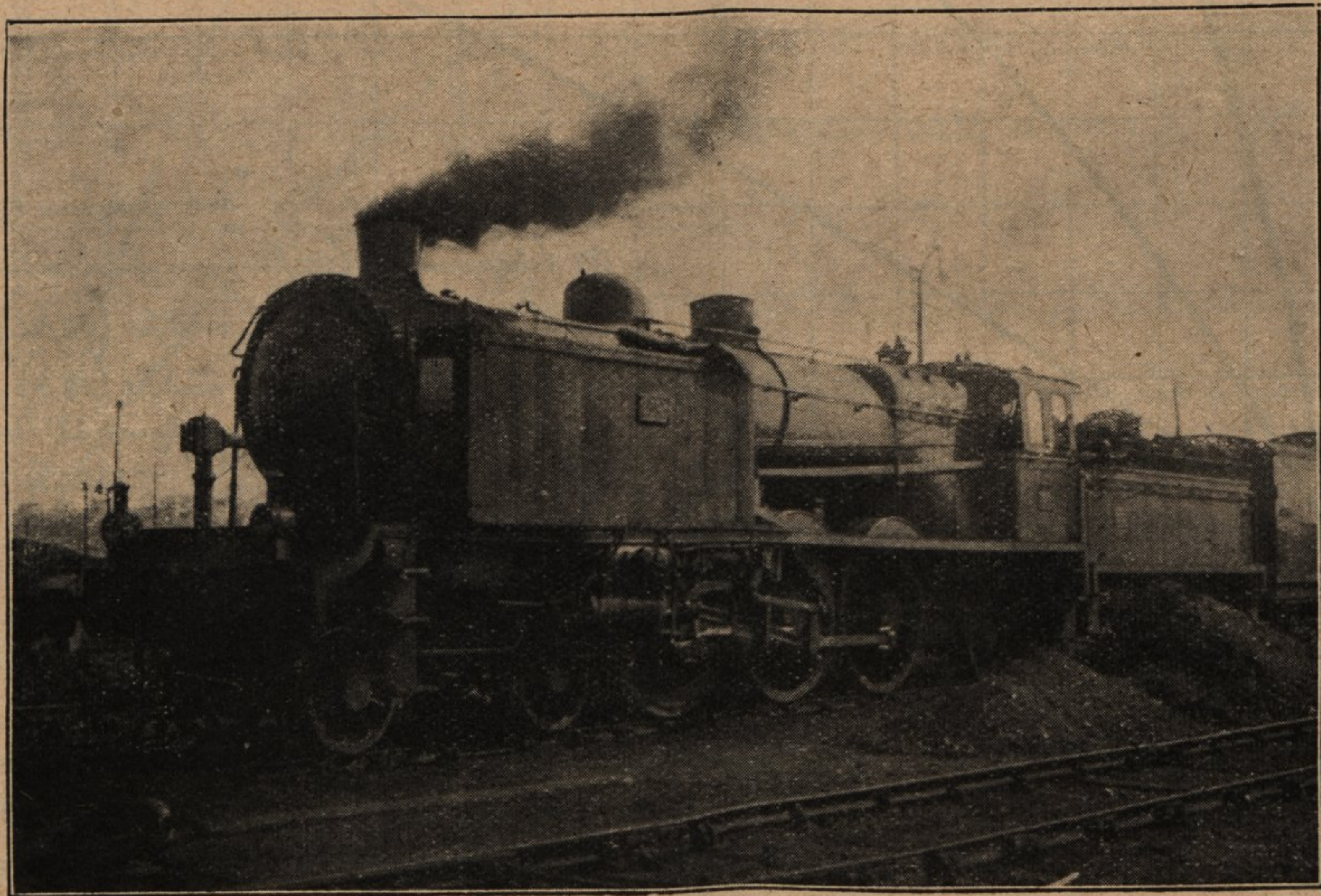
La raison de cette disposition particulière se trouve dans les grandes sections que l'on a voulu donner aux différentes parties de l'appareil de tirage sans dépasser les limites de hauteur imposées par le gabarit (voir ci-dessus les expériences de Nozo et Geoffroy 1863).

#### IV. — RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES ÉCHAPPEMENTS 1 K/1 C et 1 K/T

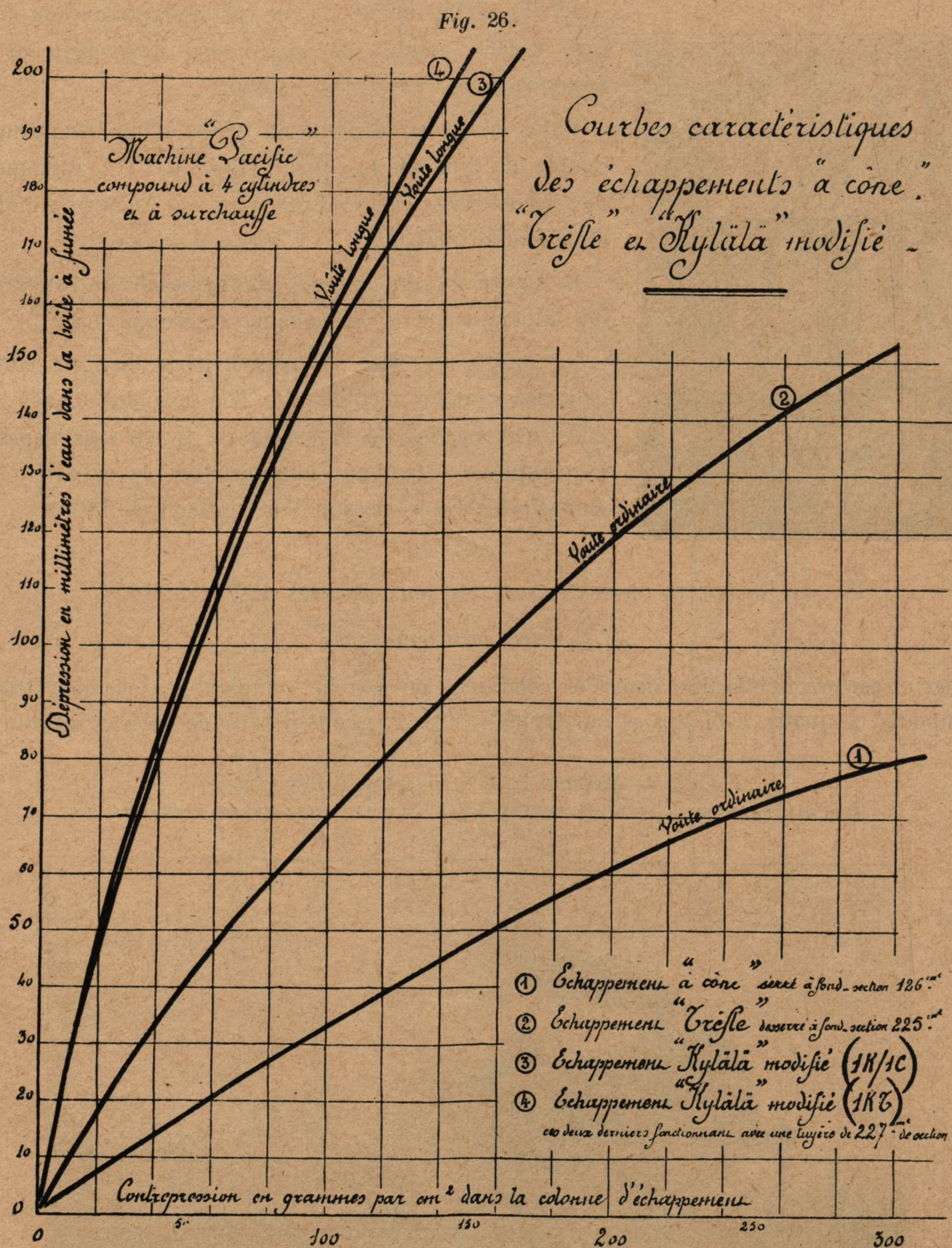
##### A) Courbes caractéristiques

Des essais précis effectués dans des conditions de marche comparables (Machine Pacific Compound à quatre cylindres et surchauffe) (Fig. 25), ont permis de relever les courbes

Fig. 25. — MACHINE PACIFIC COMPOUND A 4 CYLINDRES ET SURCHAUFFE MUNIE D'UN ÉCHAPPEMENT 1 K/T. SUR LE CÔTÉ : CABINE D'EXPÉRIENCES.



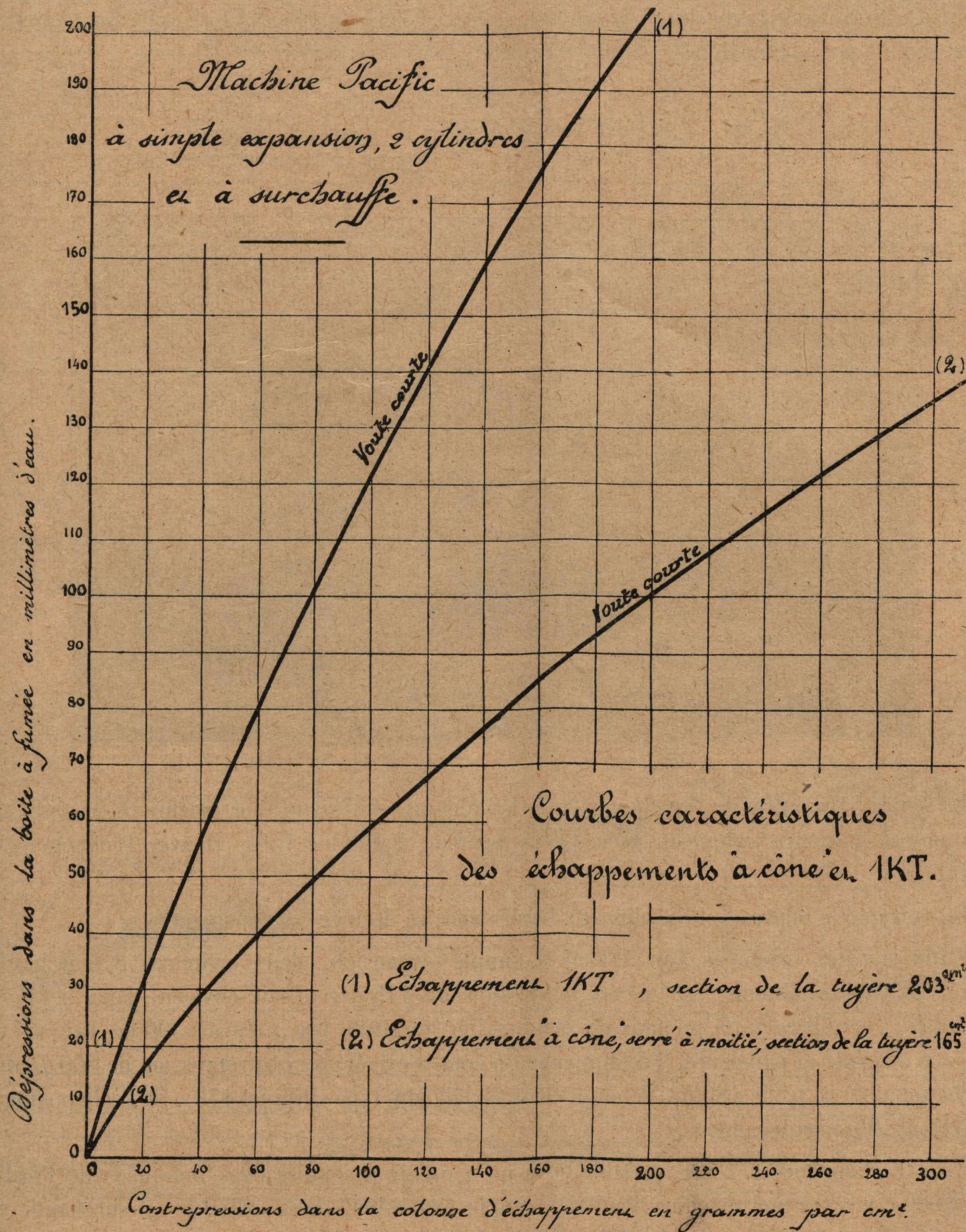
caractéristiques de l'échappement à cône mobile, de l'échappement à trèfle et des nouveaux échappements 1 K/1 C et 1 K/T.



On voit (Fig. 26) que la dépression créée dans la boîte à fumée pour une même contrepression dans la colonne d'échappement est environ le double de celle obtenue avec l'échappement à trèfle et le quadruple de celle obtenue avec l'échappement à cône. Toutefois, nous devons faire remarquer que les résultats très inférieurs trouvés avec l'échappement à cône dans ce cas particulier sont dus en partie au degré de serrage exagéré qu'il a été nécessaire de donner

à cet échappement pour obtenir sur la locomotive expérimentée une puissance de vaporisation suffisante.

Fig. 27.

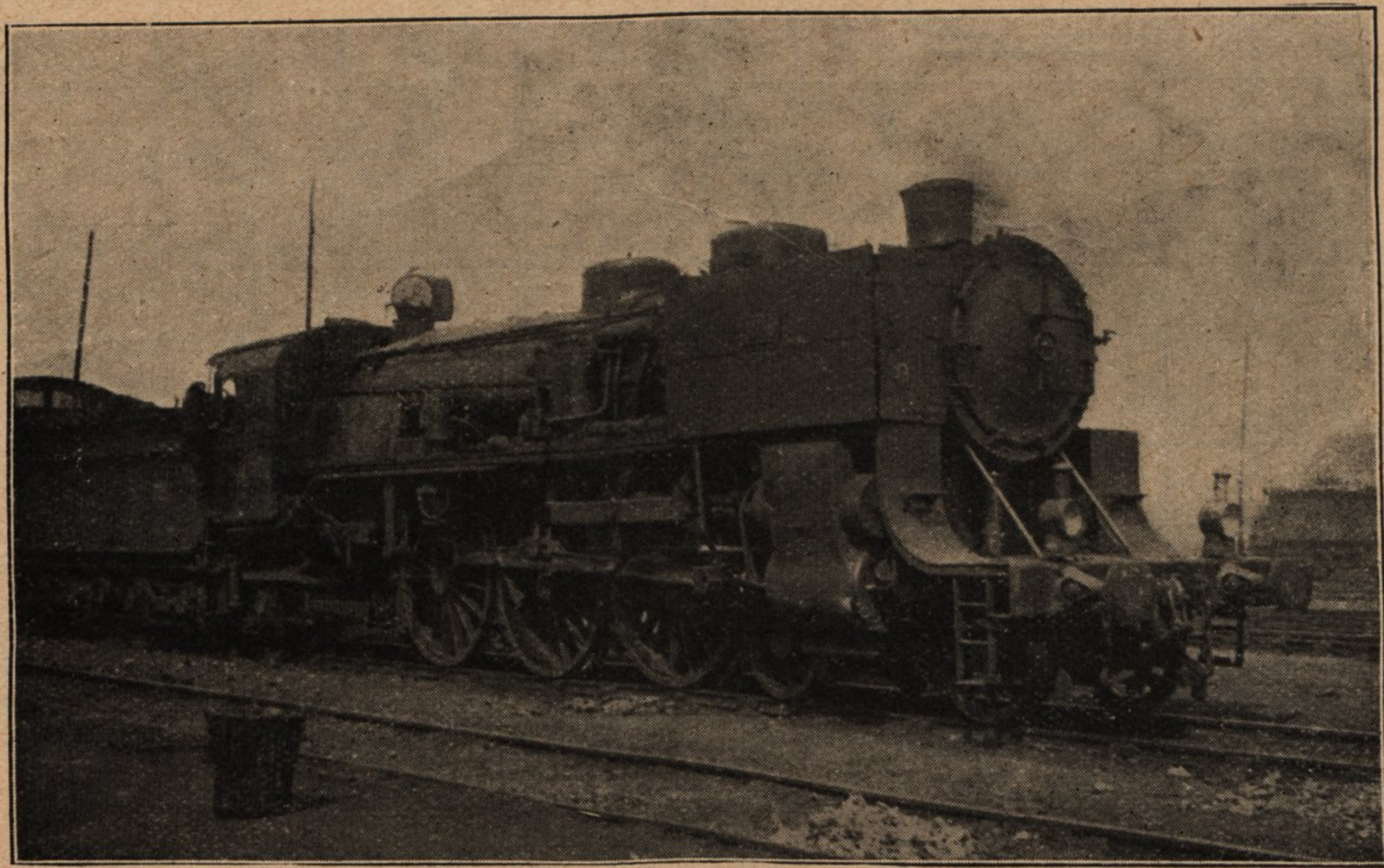


La figure 27 donne une idée plus exacte des valeurs respectives réelles de l'échappement 1 K/T et de l'échappement à cône. Les courbes de cette figure se rapportent à une machine Pacific à deux cylindres S-E et surchauffe (Fig. 28). On voit que la dépression obtenue

avec l'échappement 1 K/T est également le double environ de celle obtenue avec l'échappement à cône mobile.

Les figures 29 et 30 donnent pour les deux types de machines ci-dessus les courbes de dépression et de contrepression relevées en service soit avec l'échappement 1 K/T et l'échappement à trèfle pour la machine compound, soit avec l'échappement 1 K/T et l'échappement à cône mobile pour la machine à simple expansion.

*Fig. 28.* — MACHINE PACIFIC A SIMPLE EXPANSION, 2 CYLINDRES  
ET SURCHAUFFE MUNIE D'UN ÉCHAPPEMENT 1 K/T. SUR LE CÔTÉ : CABINE D'EXPÉRIENCES.



La figure 31 montre les courbes caractéristiques obtenues sur une machine Consolidation Compound à quatre cylindres avec l'échappement à double valve et avec l'échappement 1 K/1 C.

On voit que la dépression est plus que triplée avec ce dernier échappement.

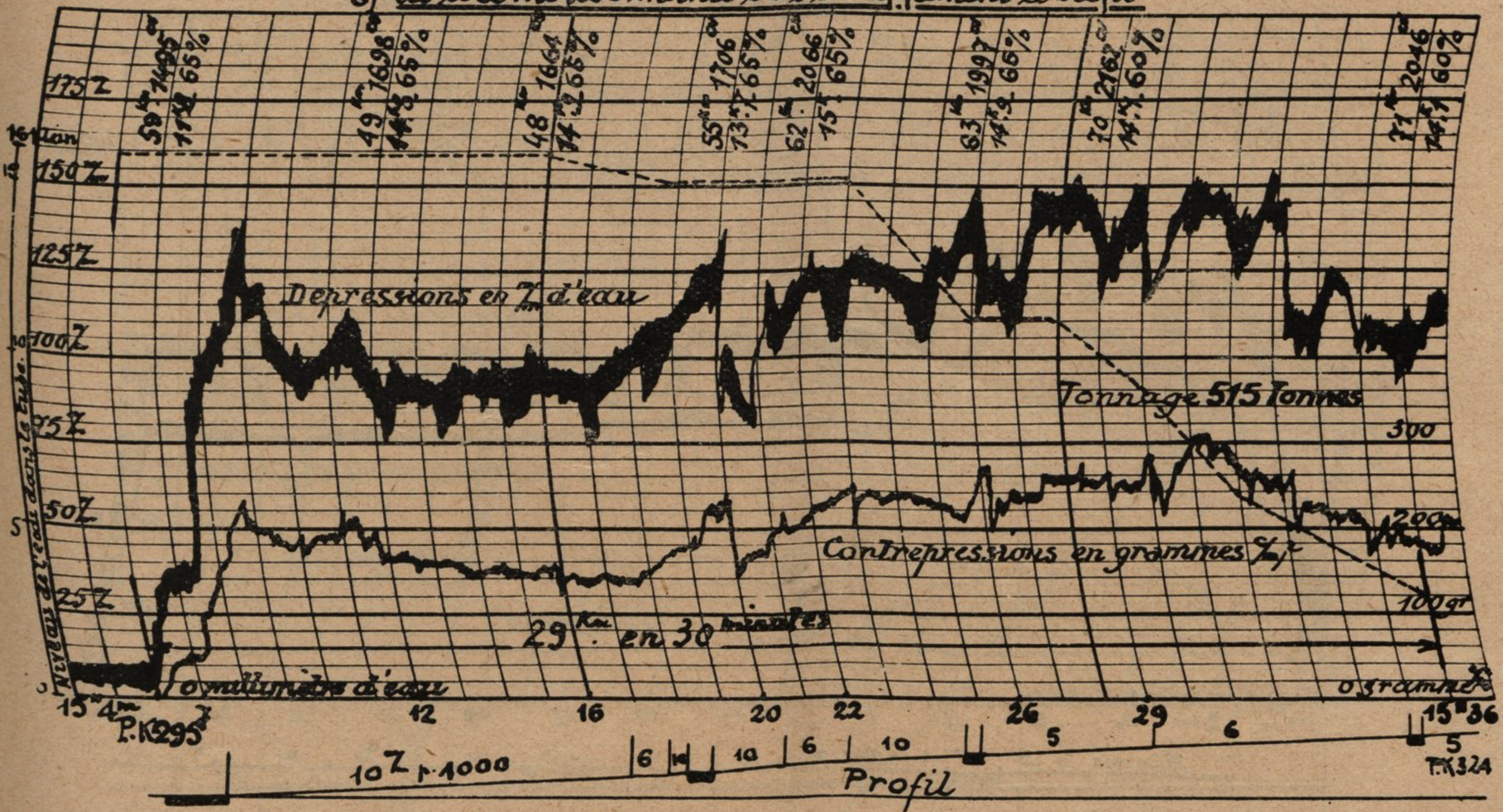
Enfin sur des machines Ten Wheel à simple expansion, deux cylindres et surchauffe (Fig. 32), pour obtenir une même dépression de 115 mm d'eau environ dans la boîte à fumée, correspondant à un taux de combustion horaire à peu près de 500 kg par  $m^2$  de surface de grille et par heure, l'échappement à cône a exigé une contrepression de 300 g/cm<sup>2</sup>, l'échappement à trèfle 180 g, l'échappement Kylälä du type originel 170 g et l'échappement 1 K/1 C de 90 g seulement.

Avec l'échappement 1 K/T variable on a pu soutenir des puissances indiquées de l'ordre de 2.000 c.v. avec une machine Pacific à simple expansion, deux cylindres et surchauffe en remorquant un train express de 650 t à 68 kmh en rampe de 5 ‰ (voir plus loin graphique des vitesses (Fig. 48), le tirage dans la boîte à fumée atteignant 190 mm d'eau pour une contrepression dans la colonne d'échappement de 200 g par  $cm^2$  seulement.

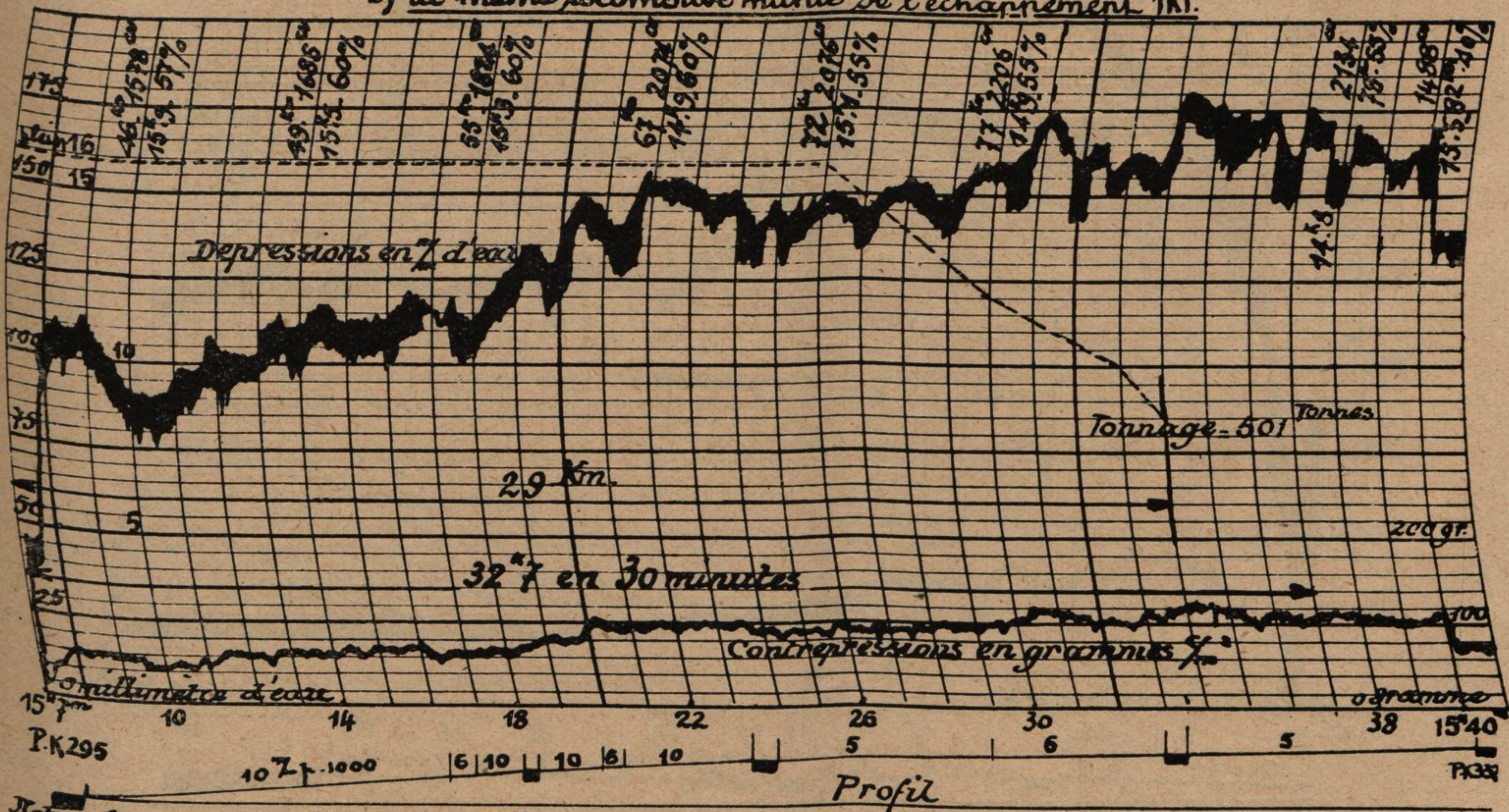


Fig. 29.

Locomotive type "Pacific", compound à 4 cylindres, surchauffe, timbrée à 16 Kas.  
 Courbes de dépression dans la boîte à fumée et de contrepression dans la colonne d'échappement relevées à l'aide d'appareils enregistreurs aux mêmes trains et aux mêmes points de la ligne;  
 a) la locomotive munie de l'échappement à biefle



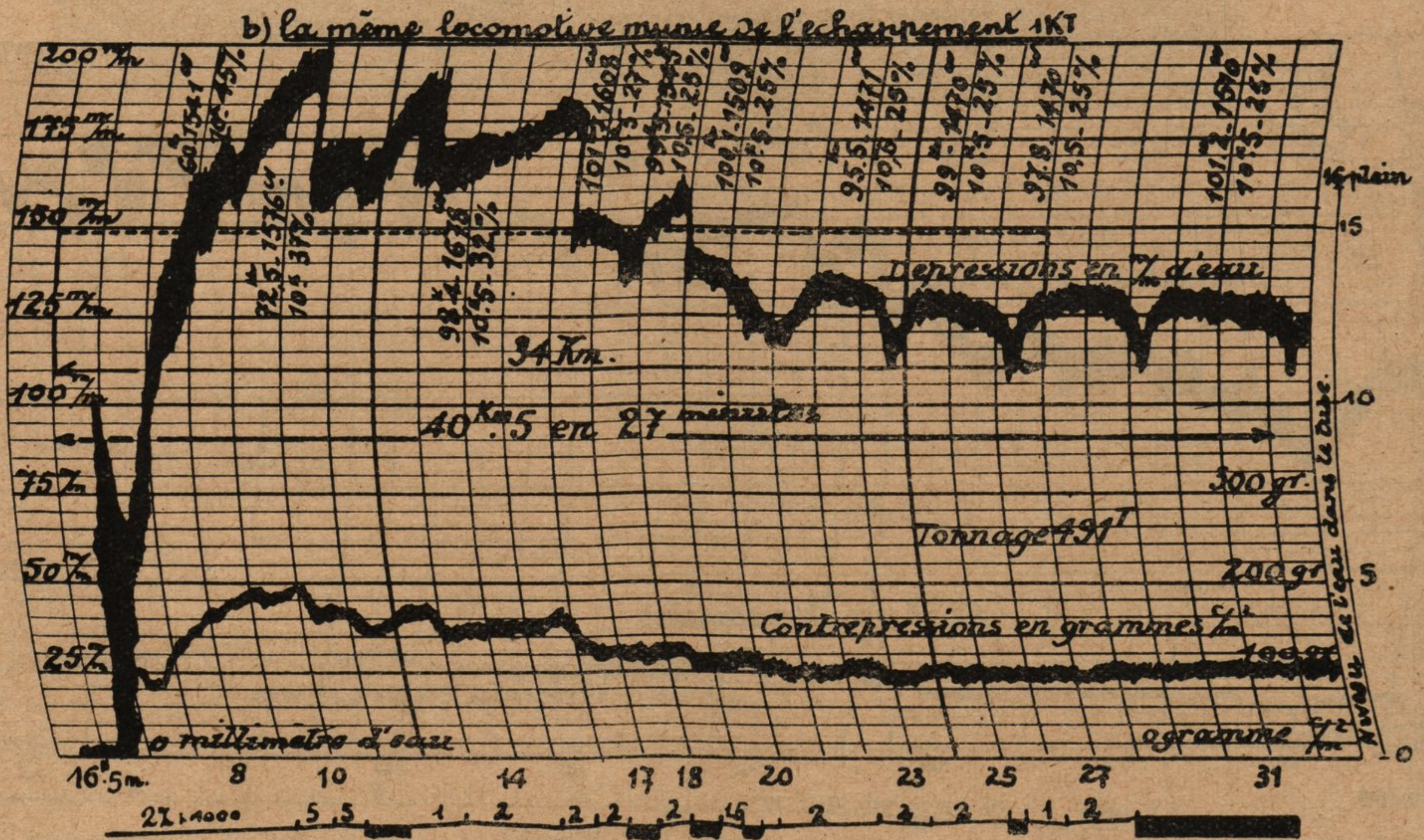
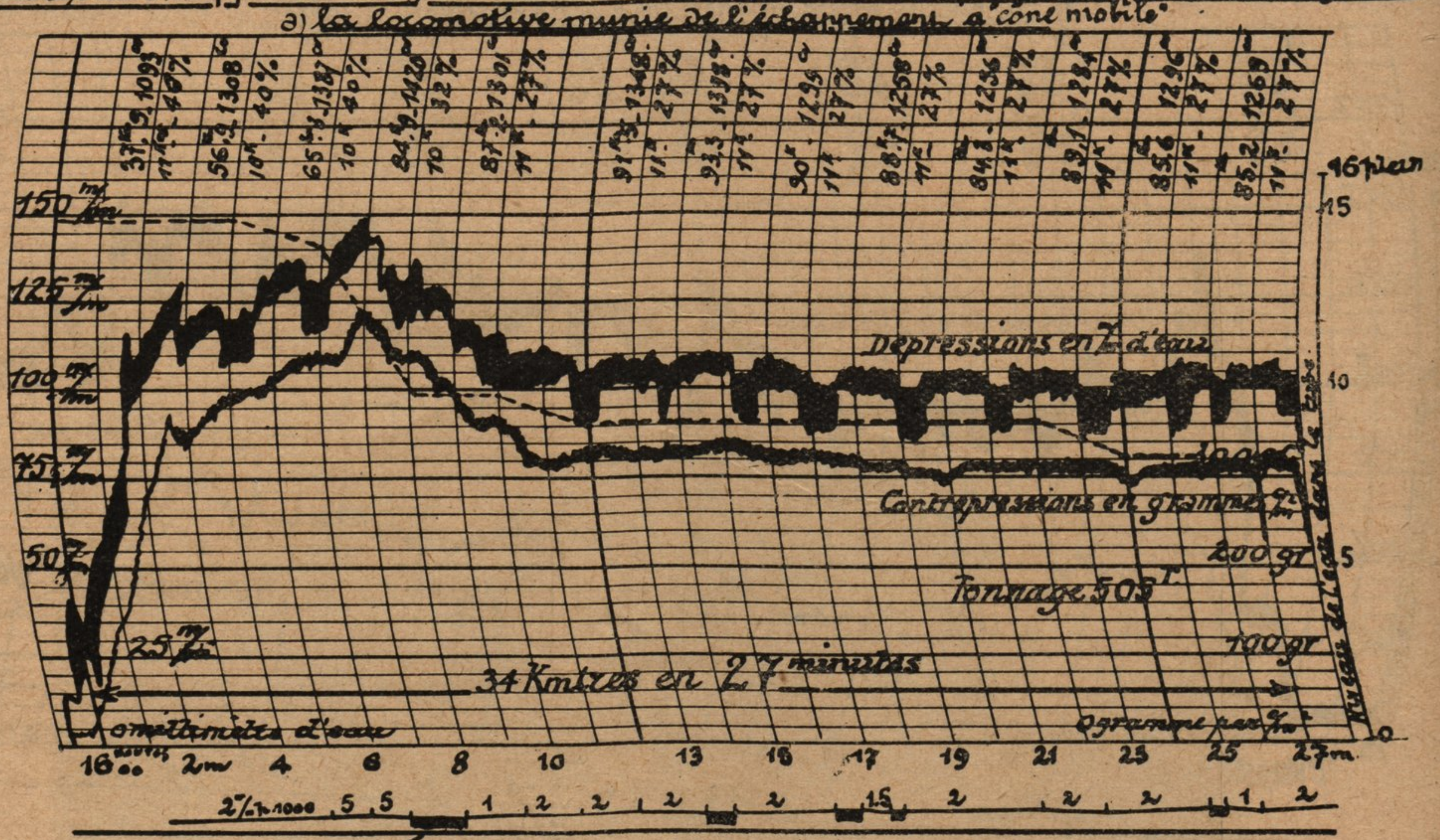
b) la même locomotive munie de l'échappement 1KT.



Nota. Les nombres placés sur les ordonnées indiquent: la vitesse en Km., la puissance indiquée en CV, la pression aux boîtes à vapeur HP, l'admission HP en %..... Niveaux de l'eau dans le tube pendant le même parcours

Fig. 30.

Locomotive type "Pacific", simple expansion, 2 cylinders, surchauffe, timb<sup>res</sup> 3 kg.  
 Courbes de dépression dans la boîte à fumée et de contrepression dans la colonne d'échappement à l'aide d'appareils enregistreurs aux mêmes trains et aux mêmes points de la ligne:

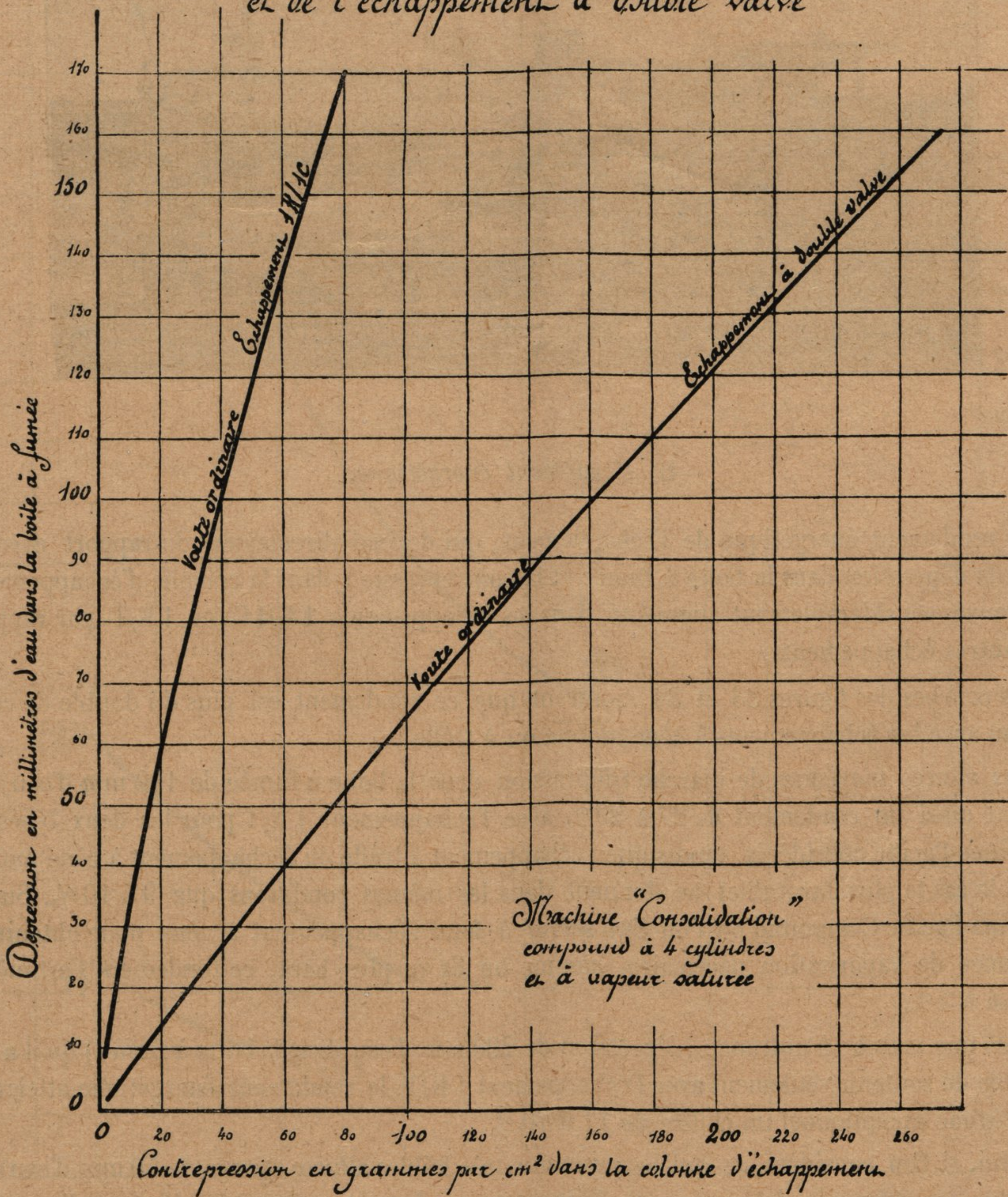


Nota. Les nombres places sur les ordonnées indiquent: la vitesse en Km/h; la puissance en CV; la pression aux boîtes à vapeur HP; l'admission HP en %..... Niveau de l'eau dans le tube pendant le même parcours.

Si la même performance avait pu être accomplie avec un bon échappement à trèfle ou avec un bon échappement à cône, la contrepression dans la colonne d'échappement eût atteint (voir courbes caractéristiques (Fig. 26 et 27) au moins 600 à 700 g/cm<sup>2</sup> et la puissance indiquée

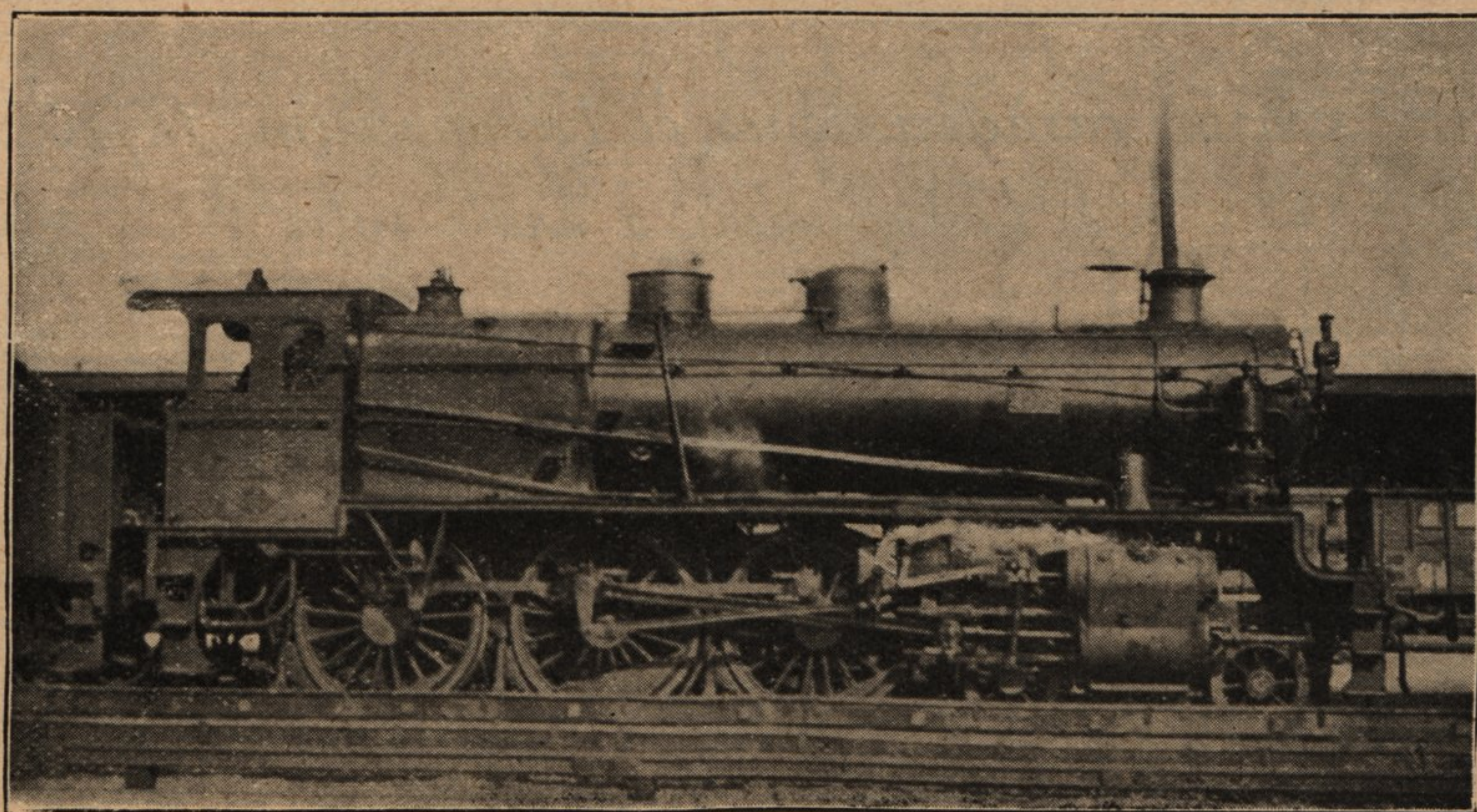
Fig. 31.

Courbes caractéristiques de l'échappement 1R/1C  
et de l'échappement à double valve



développée par la machine aurait été diminuée de 200 à 250 c.v. soit 10 % à 12 %, ce qui l'eût naturellement empêchée de soutenir la même vitesse.

Fig. 32. — MACHINE TEN-WHEEL A SIMPLE EXPANSION, 2 CYLINDRES  
ET SURCHAUFFE MUNIE DE L'ÉCHAPPEMENT 1 K/1 C.



#### B) Rendement énergétique.

Le rendement énergétique de l'échappement, qui dépend directement du rapport existant entre la dépression dans la boîte à fumée et la contrepression dans la colonne d'échappement, se trouve considérablement augmenté dans les échappements 1 K/1 C ou 1 K/T par rapport aux autres échappements.

Les courbes des figures 33 et 34 montrent que ce rendement est plus du double de celui obtenu avec les échappements à cône mobile ou à trèfle.

Aux allures moyennes de marche (dépression dans la boîte à fumée de 100 mm d'eau) on obtient ainsi un rendement de 27 à 29 % avec l'échappement 1 K/T pour les deux types de machines Pacific considérés, tandis que l'échappement à trèfle ou l'échappement à cône mobile (dans le cas le plus favorable) ne donnent dans les mêmes conditions que 9 à 10 %. Sur la machine Pacific Compound où l'on dût serrer à fond l'échappement à cône pour obtenir la puissance de vaporisation nécessaire, comme on l'a vu plus haut, ce rendement s'est même abaissé à 4 %.

Dans une marche à outrance (dépression de 200 mm d'eau dans la boîte à fumée) qu'il a été possible de soutenir seulement avec l'échappement 1 K/T, le rendement énergétique atteignait à ce régime exceptionnel un chiffre de 17 à 20 %.

Enfin, si l'on considère ce qui se passe aux très faibles allures (tirage de 50 mm d'eau) on voit que les nouveaux échappements donnent un rendement qui avoisine 40 % tandis que les échappements à cône (dans le cas le plus favorable) ou à trèfle donnent environ 15 % sauf quand le serrage est exagéré, auquel cas on n'a plus que 7 à 8 %.

Ces quelques exemples suffisent pour montrer la supériorité marquée des nouveaux échappements.

Fig. 33.

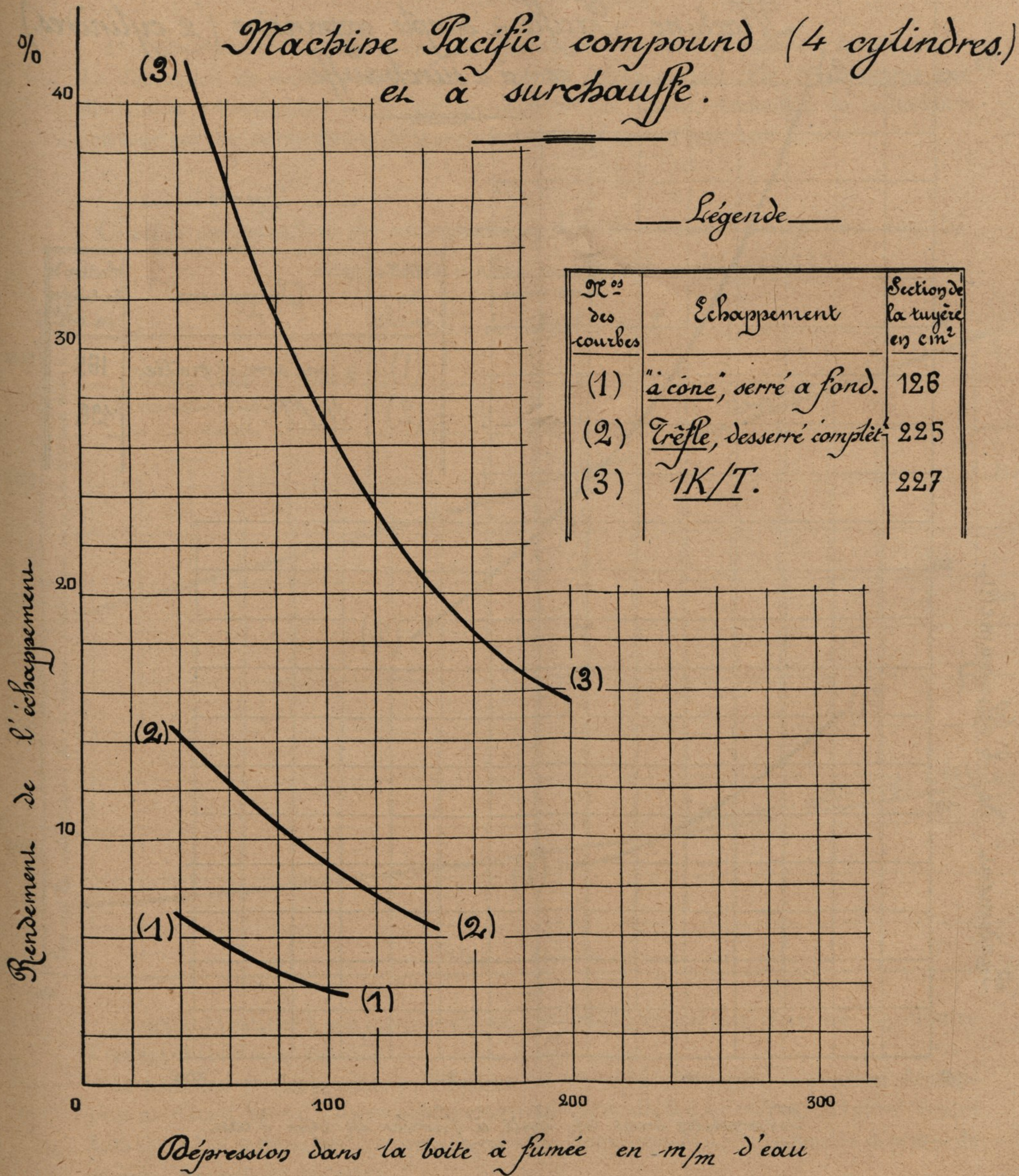
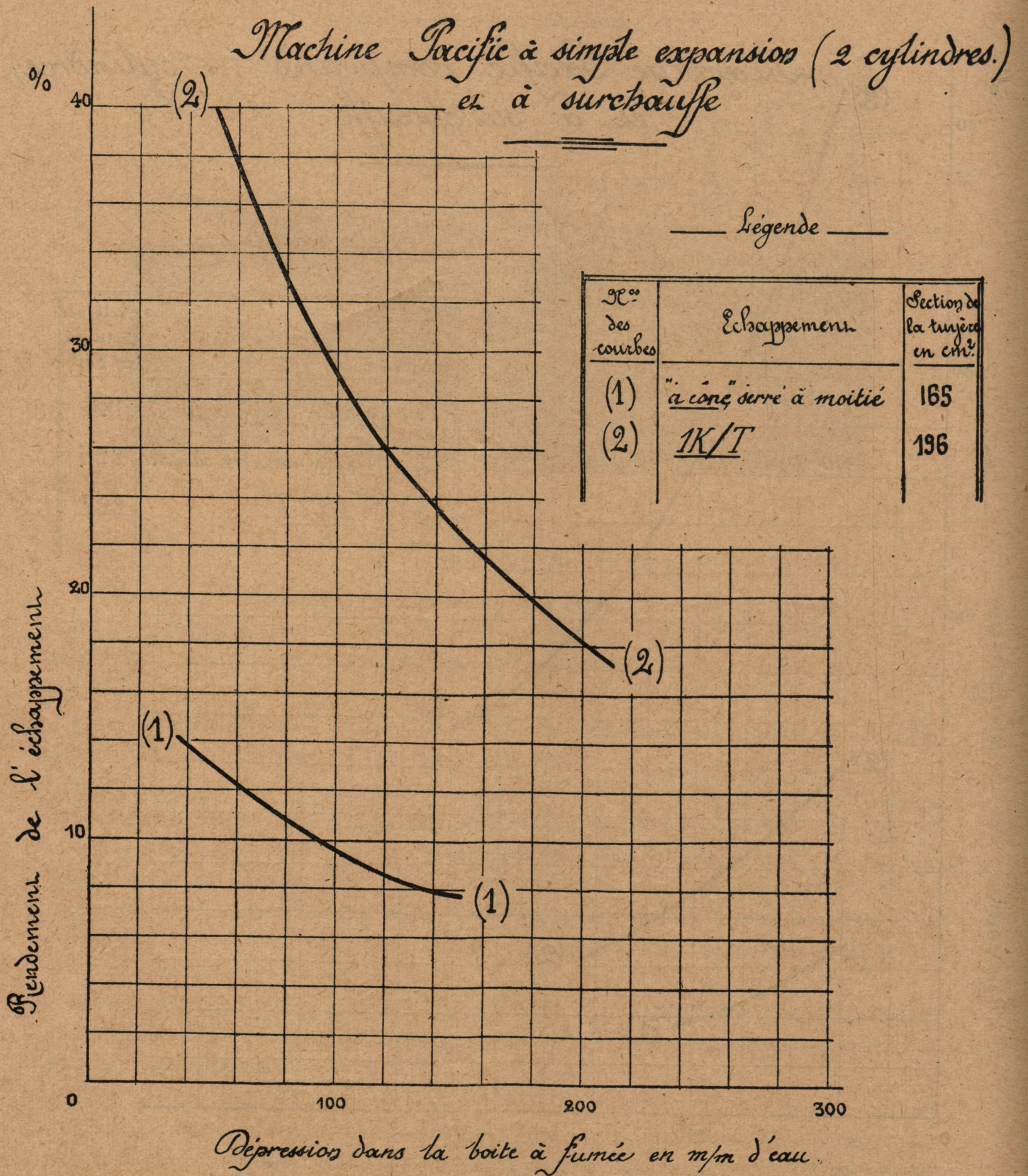


Fig. 34.



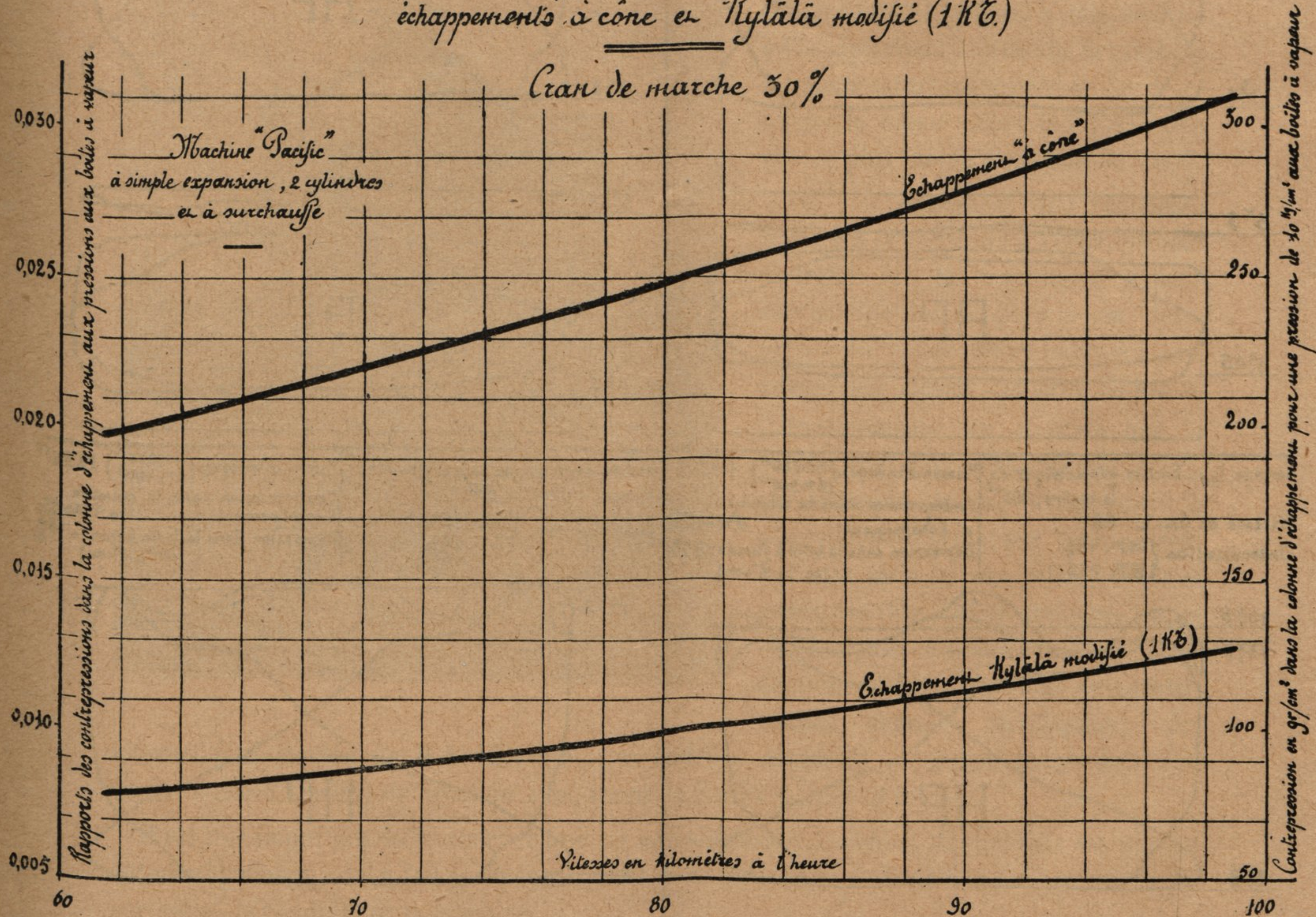
C) Conséquence du rendement énergétique élevé des échappements 1 K/1 C et 1 K/T sur le fonctionnement général de la locomotive

I. — MÉCANISME MOTEUR

1° Augmentation du travail moteur par diminution de la contrepression sur les pistons. — La diminution de contrepression dans la colonne d'échappement (Fig. 35) entraîne une diminution correspondante de la contrepression sur les pistons, diminution qui se traduit à son tour par une augmentation de la surface des diagrammes d'indicateur.

Fig. 35.

Courbes comparatives des contrepressions dans la colonne d'échappement avec les échappements "à cône" et Kylälä modifié (1 K C)



La figure 36 relative à une machine Pacific Compound à vapeur saturée est très significative à cet égard (voir aussi Fig. 37).

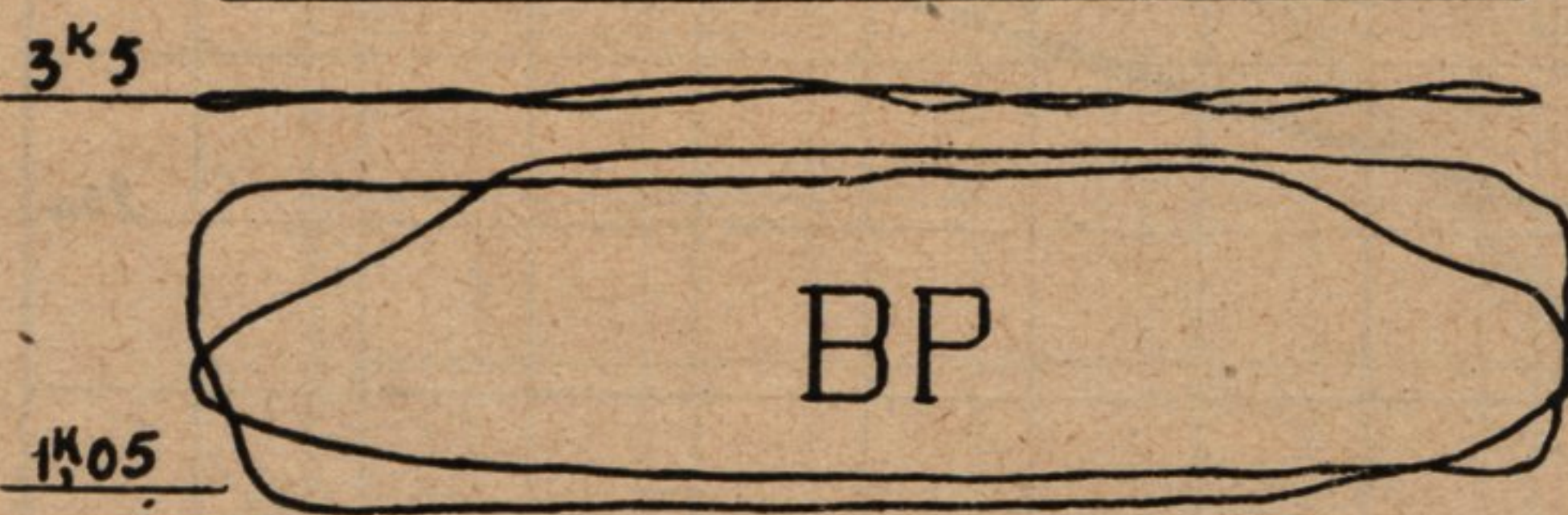
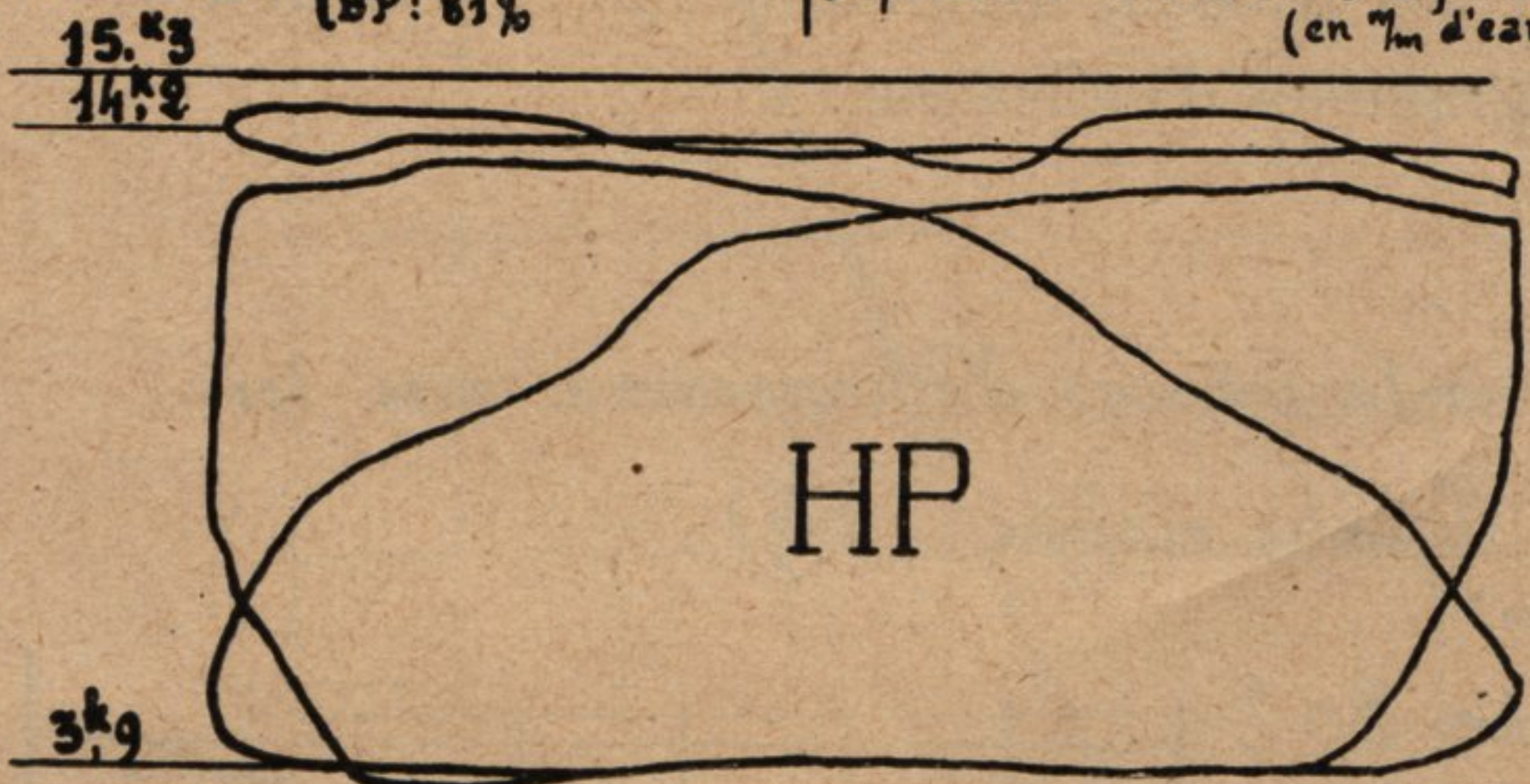
La puissance développée par les cylindres BP est nettement accrue, la pression d'échappement n'étant avec l'échappement perfectionné que de  $0,6 \text{ kg/cm}^2$  et  $0,4 \text{ kg/cm}^2$  contre  $1,05 \text{ kg/cm}^2$  et  $0,80 \text{ kg/cm}^2$  [respectivement avec l'échappement à cône pour des dépenses de vapeur à peu près équivalentes.

Fig. 36.

Machine "Pacific", compound à 4 cylindres, à vapeur saturée, timbrée à 16 kilogs, à roues motrices de 1,820

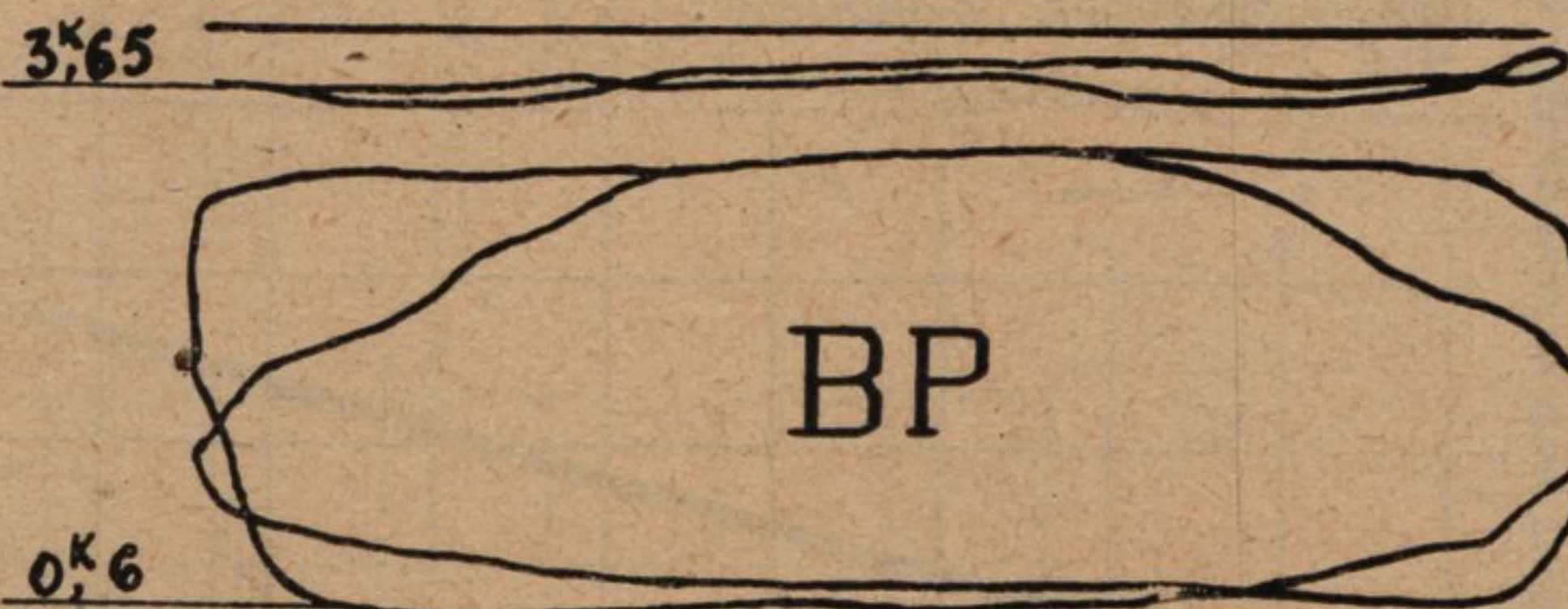
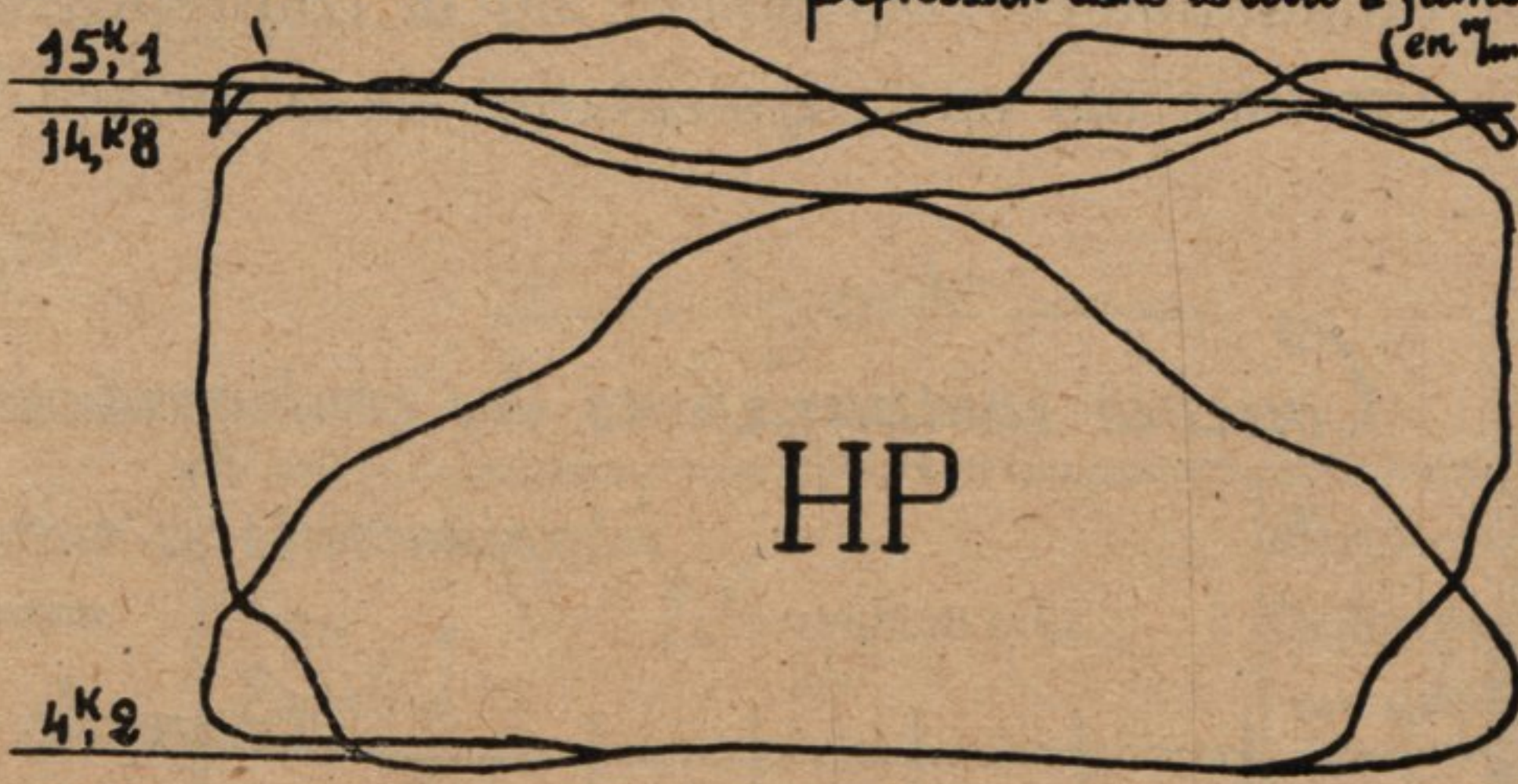
Echappement variable "à cône"

Serrage 5/10 - Section géométrique de la tuyère: 165<sup>cm²</sup> Puissance indiquée {HP: 700<sup>CV</sup> BP: 430<sup>CV</sup>} 1130<sup>CV</sup>  
 Vitesse en km-h: 50 Contrepression dans la colonne d'échappement: 0,140<sup>par cm²</sup>  
 Introduction {HP: 64% BP: 81%} Dépression dans la boîte à fumée: 75%  
 (en 7m d'eau)

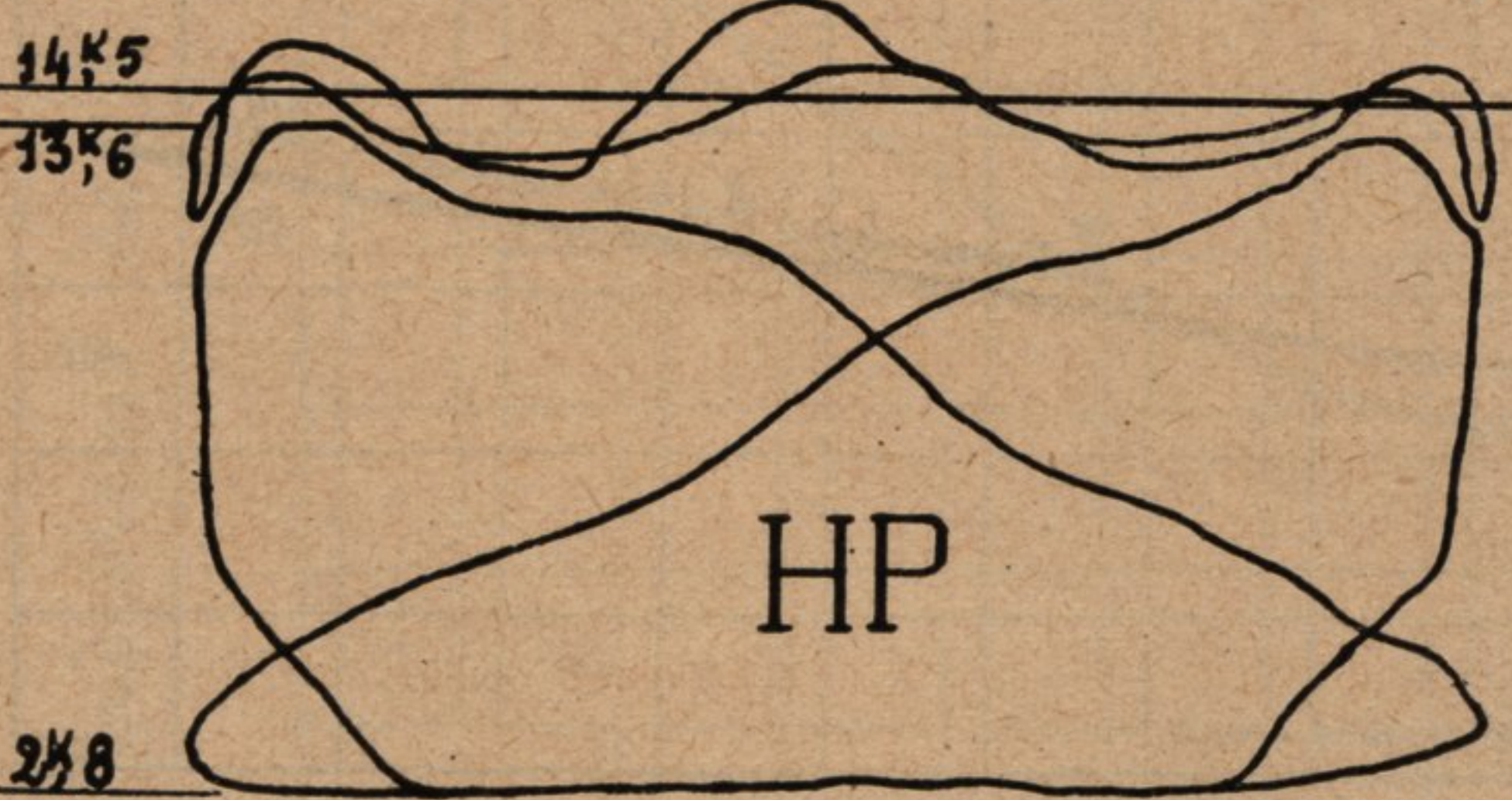


Echappement fixe, type "Hylälä" modifié

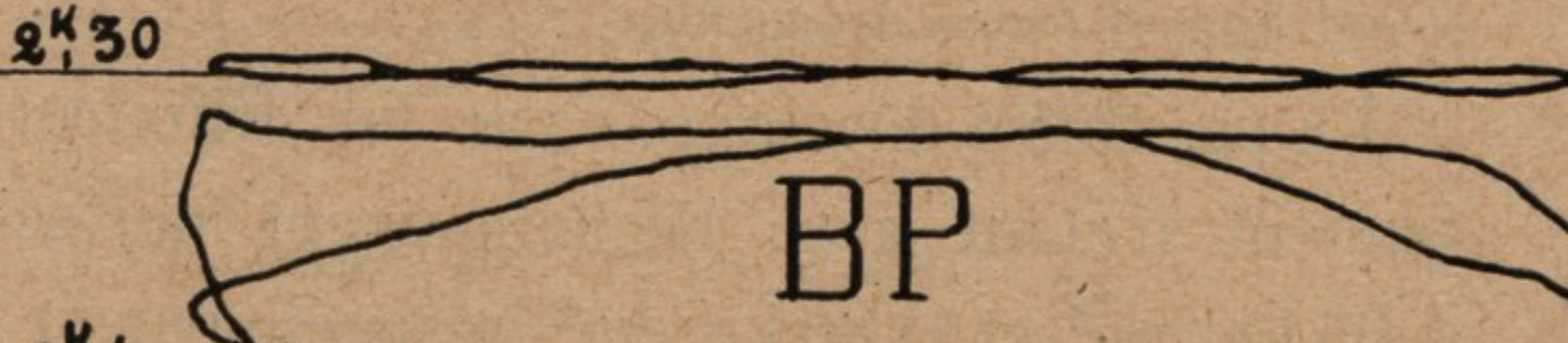
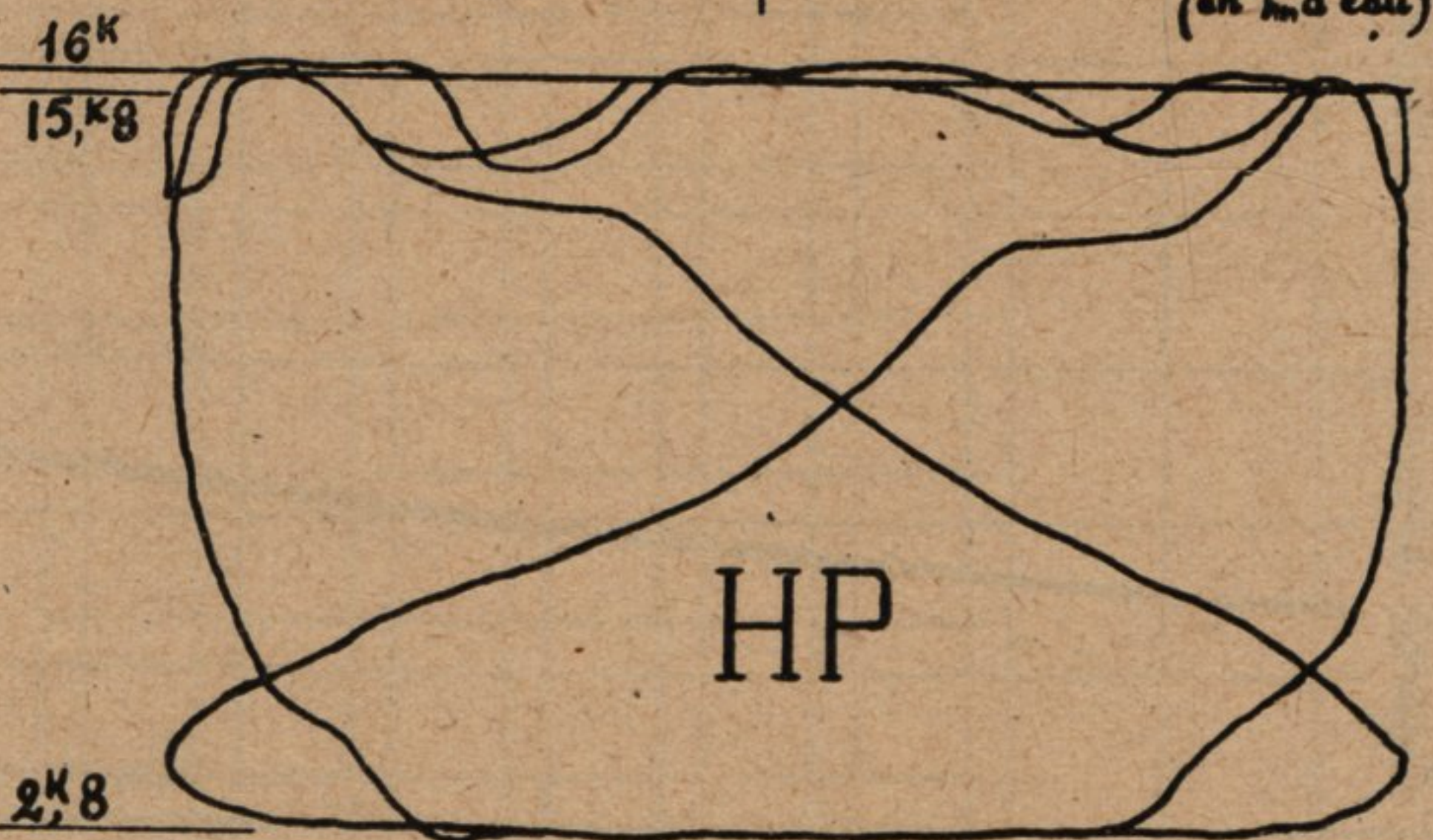
Section géométrique de la tuyère: 214<sup>cm²</sup> Puissance indiquée {HP: 732<sup>CV</sup> BP: 572<sup>CV</sup>} 1304<sup>CV</sup>  
 Vitesse en km-h: 50 Contrepression dans la colonne d'échappement: 0,140<sup>par cm²</sup>  
 Introduction {HP: 64% BP: 75%} Dépression dans la boîte à fumée: 120%  
 (en 7m d'eau)



Serrage 5/10 - Section géométrique de la tuyère: 165<sup>cm²</sup> Puissance indiquée {HP: 786<sup>CV</sup> BP: 362<sup>CV</sup>} 1148<sup>CV</sup>  
 Vitesse en km-h: 66 Contrepression dans la colonne d'échappement: 0,1340<sup>par cm²</sup>  
 Introduction {HP: 44% BP: 73%} Dépression dans la boîte à fumée: 85%  
 (en 7m d'eau)



Section géométrique de la tuyère: 214<sup>cm²</sup> Puissance indiquée {HP: 840<sup>CV</sup> BP: 416<sup>CV</sup>} 1256<sup>CV</sup>  
 Vitesse en km-h: 63 Contrepression dans la colonne d'échappement: 0,1080<sup>par cm²</sup>  
 Introduction {HP: 36% BP: 69%} Dépression dans la boîte à fumée: 75%  
 (en 7m d'eau)





Les courbes de la figure 38 montrent à leur tour comment varient les efforts indiqués en fonction de la vitesse de marche et suivant le type d'échappement employé :

1° Sur la machine Pacific à vapeur saturée considérée ci-dessus (Fig. 37) munie soit d'un échappement à cône (serré à moitié) soit d'un échappement Kylälä modifié.

Fig. 37. — MACHINE COMPOUND 4 CYLINDRES A VAPEUR SATURÉE.  
SUR LE CÔTÉ : CABINE A EXPÉRIENCES.



2° Sur une machine du même type mais à vapeur surchauffée (Fig. 25) munie d'un échappement à trèfle (complètement desserré) soit d'un échappement 1 K/T.

On voit immédiatement que la substitution de l'échappement Kylälä, modifié à l'échappement à cône sur la machine à vapeur saturée, lui permet de développer le même effort indiqué à une vitesse plus élevée d'environ 30 km/h.

On voit également que l'échappement 1 K/T substitué à l'échappement à trèfle sur la machine à vapeur surchauffée lui a permis de développer le même effort indiqué à une vitesse plus élevée d'environ 20 km/h.

Pratiquement, on constate que la substitution d'un échappement 1 K/T par exemple à un échappement à cône mobile, permet sur les machines de cette série ou sur celles de séries analogues (Fig. 39) d'atteindre, toutes choses égales d'ailleurs (mêmes introductions, mêmes pressions de marche, mêmes charges remorquées), des

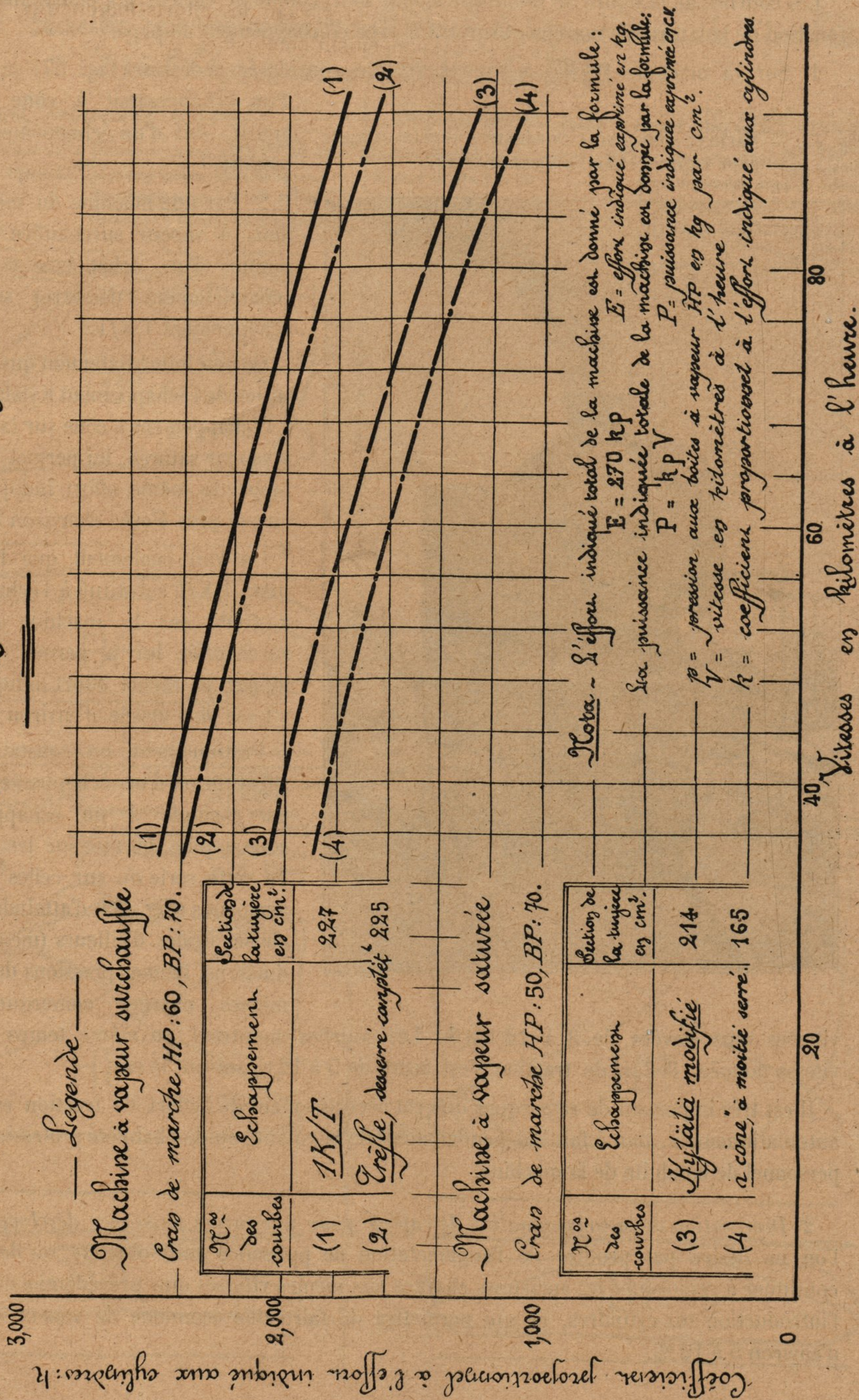
vitesse plus élevées de 8 à 12 km/h. Les courbes montrent en même temps qu'à une vitesse donnée, l'effort de traction s'est accru de 5 à 12 % suivant le cas.

Il est très important de remarquer que cet accroissement de l'effort de traction est obtenu automatiquement, tout à fait indépendamment de la volonté ou de l'habileté professionnelle du personnel de conduite de la machine.

2° *Diminution de la consommation de vapeur pour une même puissance développée.* — Si l'on ne désire pas profiter de l'augmentation de puissance ainsi obtenue, on devra, pour continuer à remorquer les anciennes charges aux mêmes vitesses que précédemment, réduire l'introduction aux cylindres, ce qui permettra de faire une économie de vapeur également d'environ 5 à 12 %.

Fig. 38.

# Machines Pacific compound à 4 cylindres.

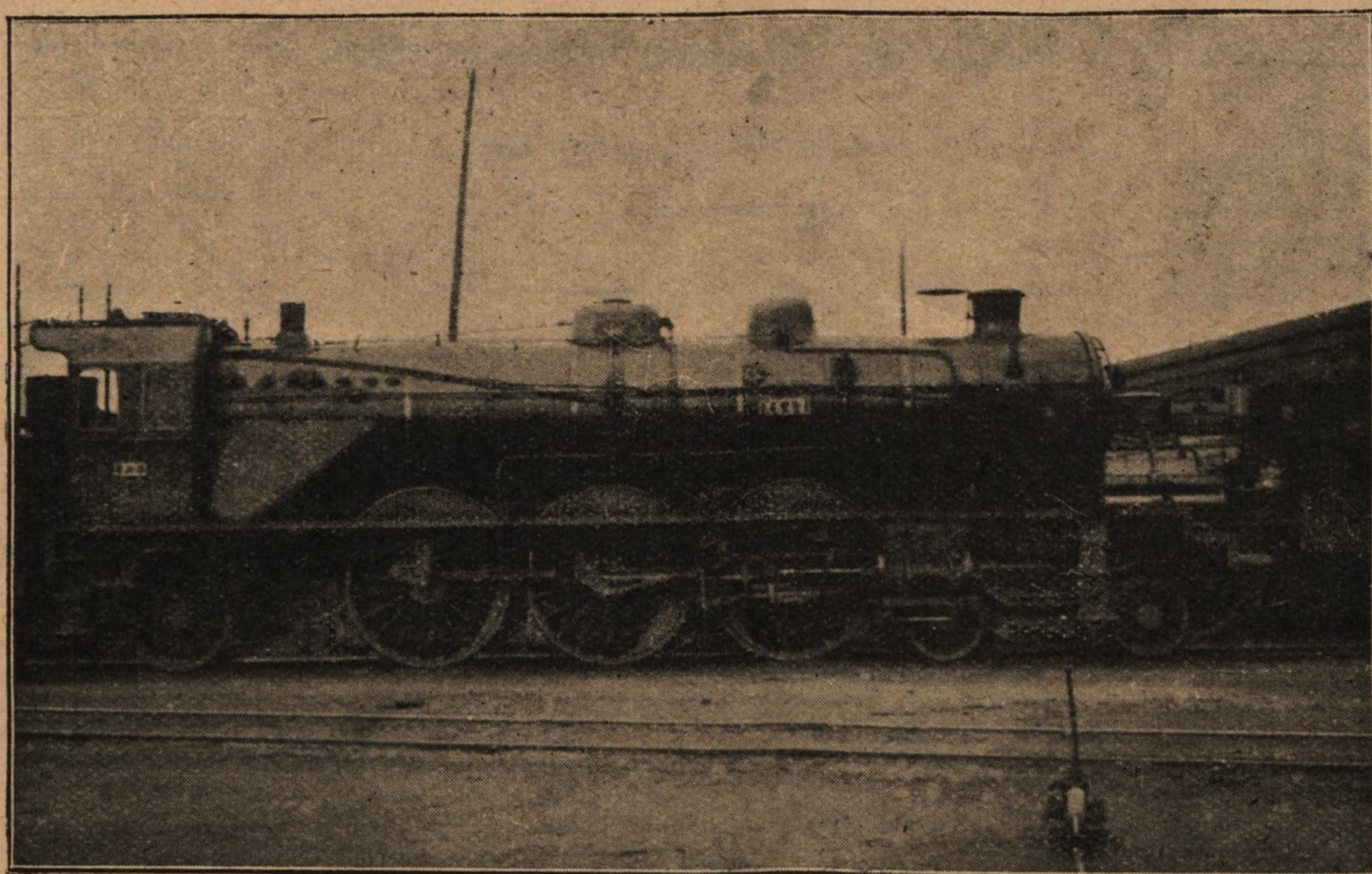


Nota - L'effort indiqué total de la machine est donné par la formule:  
 $E = 270 kP$   $E =$  effort indiqué exprimé en kg.  
 Les puissances indiquées totales de la machine est donné par la formule:  
 $P = kPV$   $P =$  puissance indiquée exprimée en cv.  
 $P =$  pression aux boîtes à vapeur HP en kg par cm<sup>2</sup>.  
 $V =$  vitesse en kilomètres à l'heure.  
 $k =$  coefficient proportionnel à l'effort indiqué aux cylindres.

C'est ainsi que, sur certaines machines compound du type Consolidation, il a été possible de ramener l'introduction aux cylindres HP de 55 à 40 %.

En fait, les mécaniciens sont naturellement portés, surtout au début de l'application du nouvel échappement, à ne pas profiter intégralement de l'avantage économique qui se présente

Fig. 39. — MACHINE PACIFIC COMPOUND  
4 CYLINDRES SURCHAUFFE MUNIE DE L'ÉCHAPPEMENT 1 K/T.



ainsi à eux, mais plutôt à utiliser en partie l'excédent de puissance disponible pour observer l'horaire avec moins de difficulté et notamment en ne perdant plus de temps aux endroits difficiles du parcours.

Finalement l'économie pratique obtenue dans l'ensemble du service sera inférieure aux chiffres cités plus haut, mais ce service s'accomplira plus facilement et avec plus de régularité.

## II. — CHAUDIÈRE.

1° *Augmentation du rendement thermique.* — Le tirage intense qu'il est loisible d'obtenir avec les échappements 1 K/1 C et 1 K/T permet d'utiliser la chaudière dans les meilleures conditions de rendement thermique.

La faculté de réaliser un tirage intense permet en effet :

a) De brûler le combustible en couche mince, sans que l'on ait à craindre de ne pouvoir maintenir que difficilement la pression dans la chaudière ;

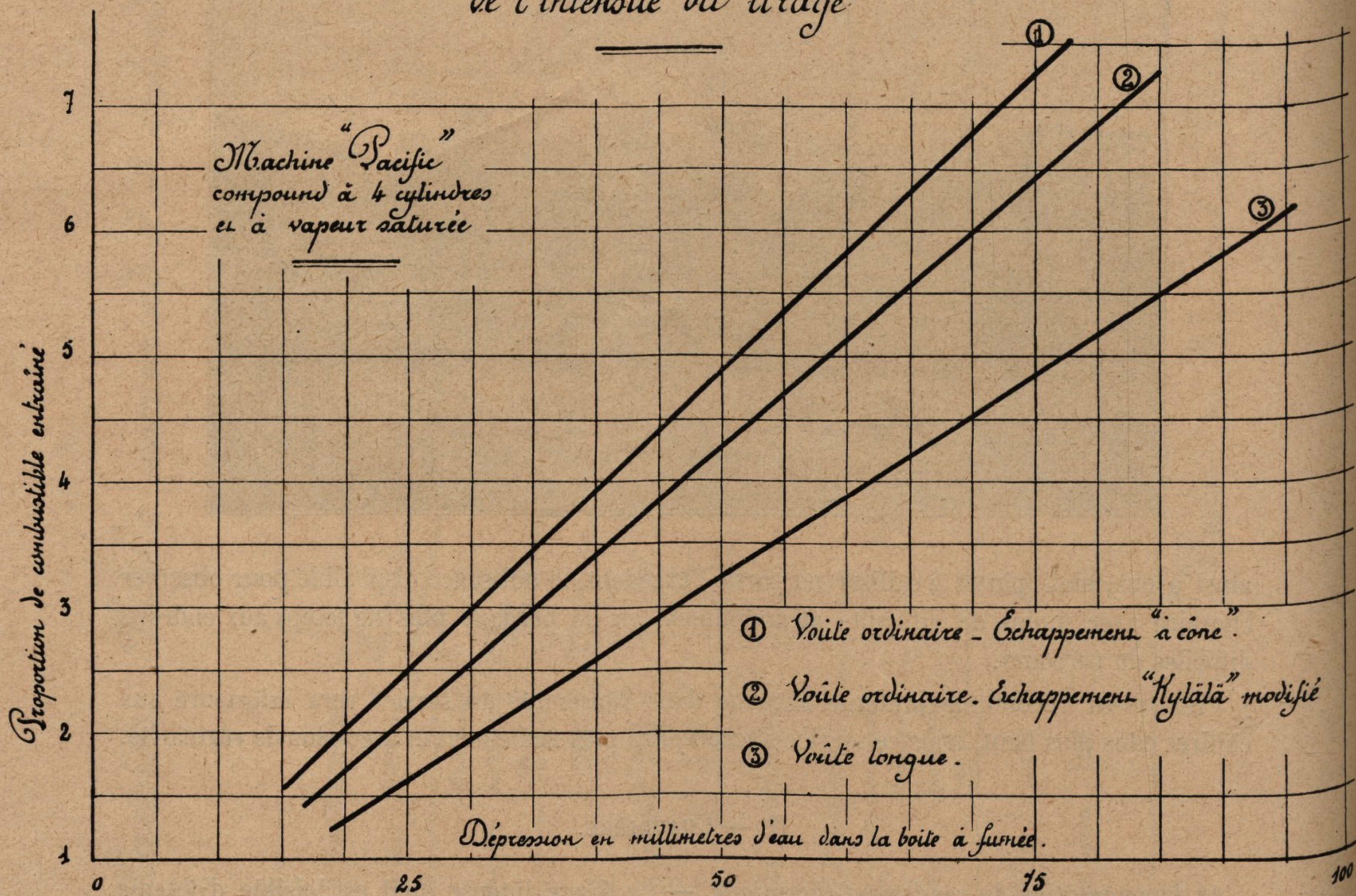
L'expérience semble bien avoir montré, en effet, que le « volant de feu » nécessaire avec les échappements peu puissants devenait ici inutile.

La combustion en couche mince a l'avantage de diminuer considérablement les imbrûlés de toute sorte, solides ou gazeux.

Il y a moins d'escarbilles entraînées dans la boîte à fumée parce que le feu restant très perméable, les gaz peuvent le traverser partout avec une vitesse réduite, tandis qu'avec un feu épais ces gaz n'arrivent à se frayer un passage qu'en quelques points isolés où ils passent alors à grande vitesse, créant ainsi des cheminées dont ils arrachent les parois (Fig. 40, Exemple d'entraînement d'escarbilles).

Fig. 40.

*Proportion de combustible entraîné dans la boîte à fumée en fonction de l'intensité du tirage*



Les gaz combustibles qui échappent à la combustion sont en moins grande quantité :

1° Parce que le charbon frais distribué par charges fréquentes et légères s'allumant plus vite distille moins ;

2° Parce que l'anhydride carbonique (CO<sup>2</sup>) formé dans les premières couches du combustible en ignition ne trouve plus au-dessus d'elles une assez grande épaisseur de coke incandescent pour avoir le temps de se transformer en oxyde de carbone (CO), ce qui constitue, quand cela se produit, une véritable rétrogradation dans la combustion.

3° Parce que l'air arrivant dans la masse de combustible partout en quantité suffisante, il n'y a presque pas de formation directe d'oxyde de carbone.

b) D'installer dans les foyers des voûtes en briques réfractaires aussi développées que possible (Fig: 41 et 42).

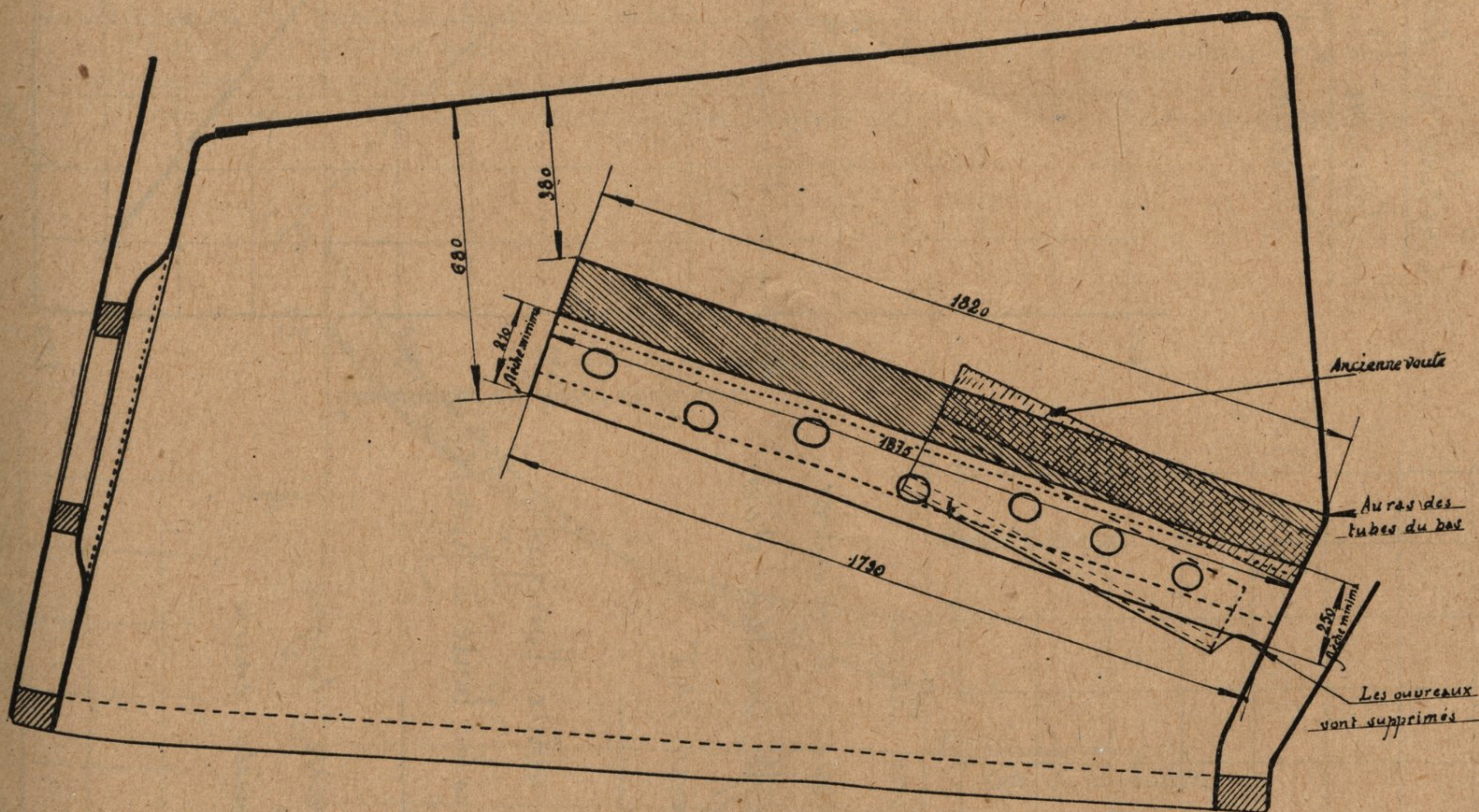
Il en résulte une amélioration encore plus complète de la combustion :

1° Par allumage plus rapide du combustible frais chargé sur la grille grâce au rayonnement émis sur lui par la voûte ;

2° Par brassage plus énergique, avec l'air en excès, des gaz qui auraient échappé à la combustion ;

3° Par arrêt très efficace des escarbilles entraînées (Fig. 40).

Fig. 41. — EXEMPLE D'APPLICATION D'UNE VOÛTE EN BRIQUES LONGUE A UNE LOCOMOTIVE PACIFIC.



L'amélioration de la combustion ainsi réalisée a pour conséquence une élévation de la température dans le foyer. Il en résulte, comme on l'a vu plus haut, une augmentation de la température des gaz de la combustion et une meilleure faculté d'absorption par les surfaces de chauffe de la chaleur qu'ils contiennent ; la force thermomotrice sous laquelle se transmet la chaleur est en effet accrue, ainsi que le coefficient de convection qui préside aux échanges.

On peut alors constater un phénomène du même ordre que celui remarqué dans le cas du préchauffage de l'air de la combustion ; c'est-à-dire, à puissance de vaporisation égale, un abaissement très net de la température à la sortie des surfaces de chauffe, c'est-à-dire ici, dans la boîte à fumée (Fig. 43) (20 à 40° suivant les cas) (1). L'augmentation qui en résulte pour le rendement de la transmission de chaleur peut être de l'ordre de 2 à 4 %.

(1) Cet abaissement de la température dans la boîte à fumée peut s'expliquer de la façon suivante :

La quantité de chaleur  $dQ$  qui traverse un élément  $dS$  de la surface de chauffe tubulaire pendant l'unité de temps a comme expression :

$$dQ = K (T - t) dS$$

Fig. 42.

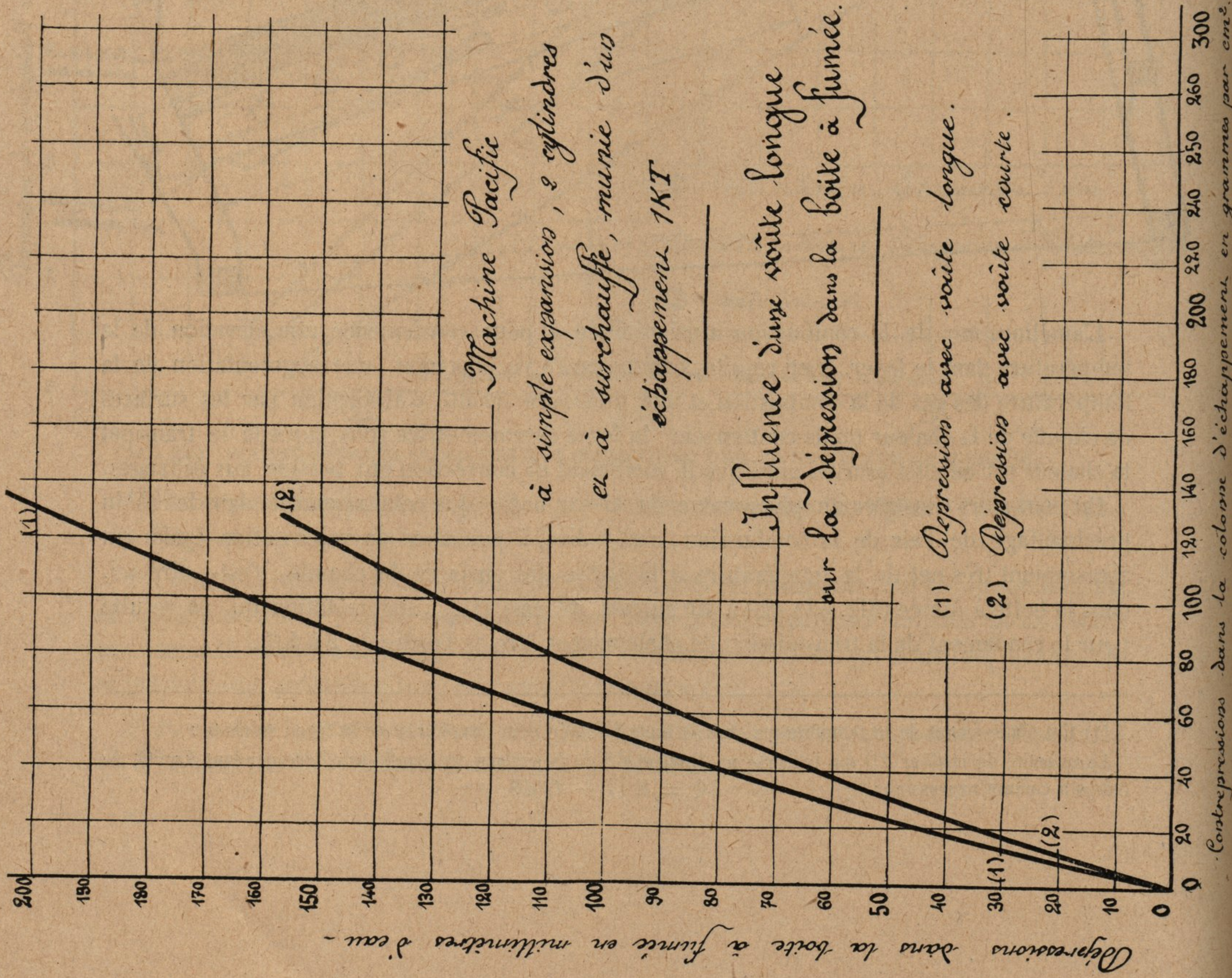
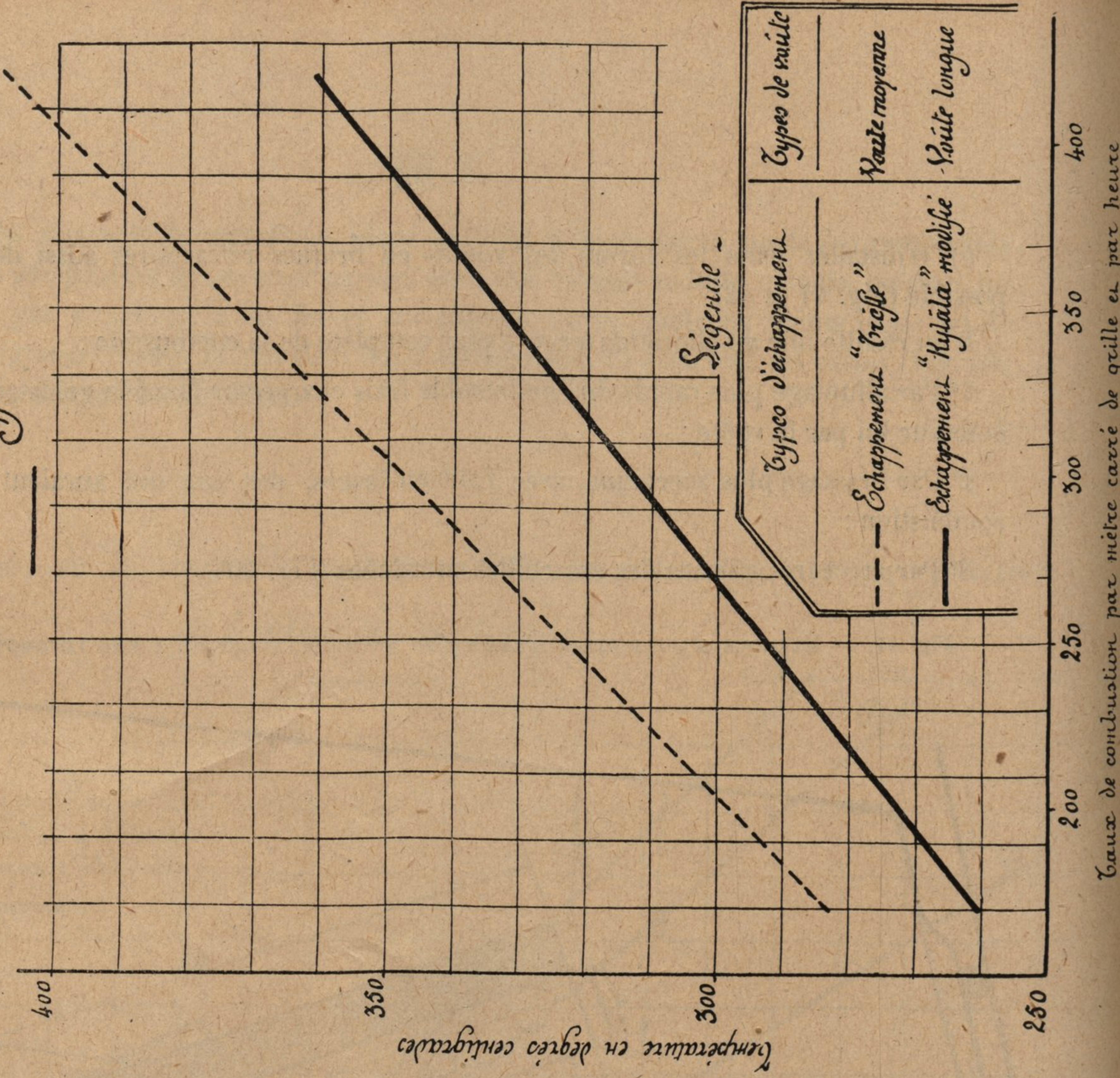


Fig. 43.

Courbes des températures dans la boîte à fumée  
en fonction du taux de combustion horaire  
Machine "Pacific" compound à 4 cylindres  
et à surchauffe



Finalement, l'augmentation totale du rendement thermique de la chaudière pourra atteindre 5 à 15 %.

C'est ce que montrent les courbes de la figure 45 qui sont très significatives à cet égard, la simple application d'un échappement 1 K/T combiné avec une voûte longue ayant permis de relever le rendement thermique d'une chaudière de machine Pacific de 60 à 68 %, pour une allure de combustion pourtant très moyenne (pour une locomotive) de 300 kg par m<sup>2</sup> de surface de grille et par heure.

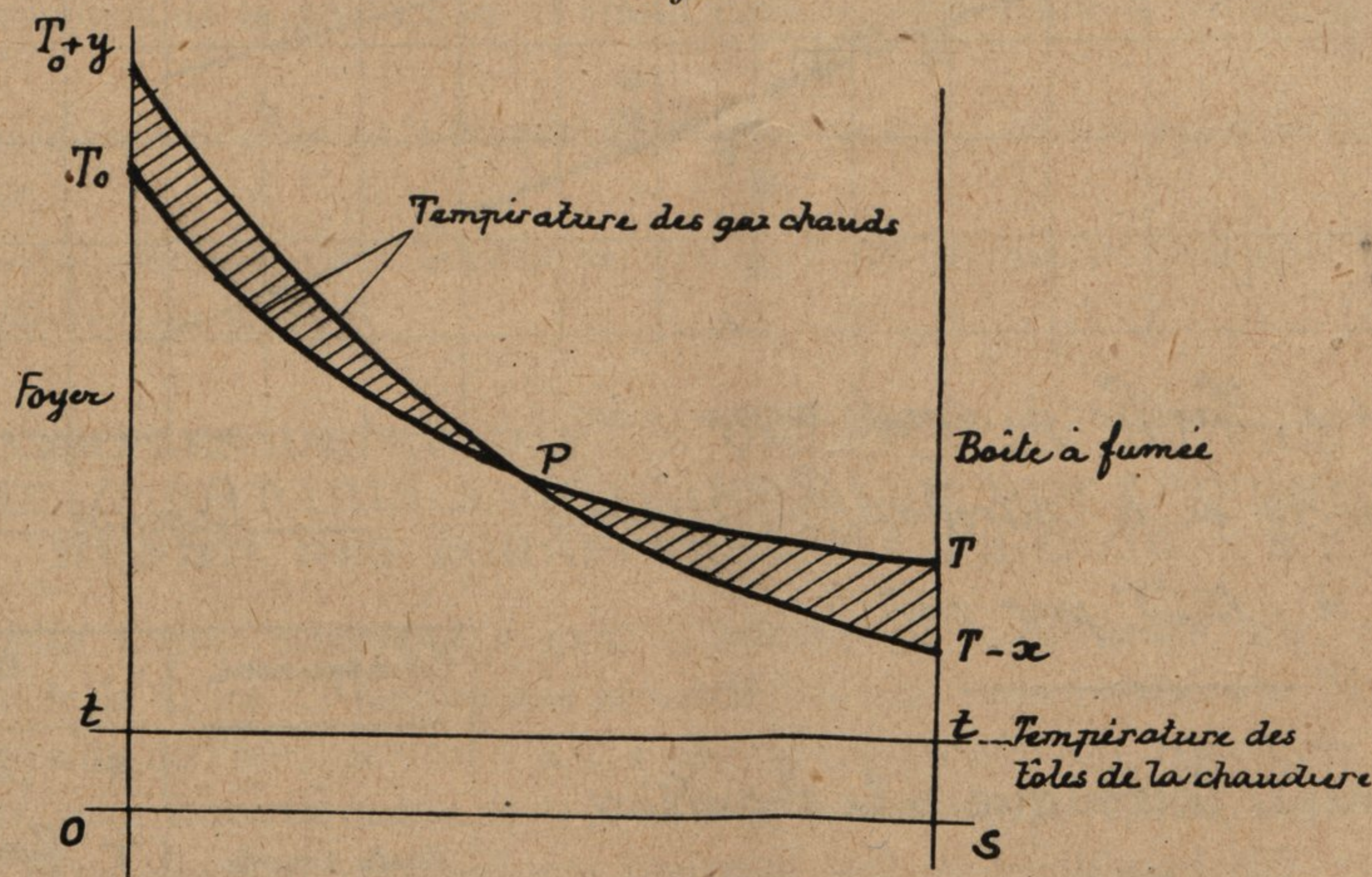
T étant la température des gaz chauds au point considéré, t la température sensiblement constante des tôles de la chaudière et K le coefficient de transmission de la chaleur.

Le terme T - t étant accru par suite de l'élévation de T, chaque élément dS sera traversé pendant l'unité de temps par une quantité de chaleur plus grande.

D'autre part, le coefficient de transmission K croît lorsque la température T des gaz augmente ; la quantité dQ sera donc encore accrue pour cette deuxième raison.

Portons en abscisses (Fig. 44) la longueur des tubes à laquelle est proportionnelle la surface de chauffe et en

Fig. 44.



ordonnées la température (T) des gaz chauds et celle (t) des tôles de la chaudière.

Traçons la courbe exponentielle classique qui exprime la loi de décroissance de la température le long des surfaces de chauffe :

$$T_{\text{gaz}} = t + (T_0 - t) e^{-ms}$$

L'aire  $T_0 t T$  représente la quantité de chaleur totale  $\int_0^s dQ$  traversant le faisceau tubulaire pendant l'unité de temps.

Si les gaz entrent plus chauds dans les tubes ( $T_0 + y$ ) la nouvelle courbe de variation de la température des gaz le long des surfaces de chauffe partira du point  $T_0 + y$  et sa pente sera plus accentuée que celle de la courbe  $T_0 T$  puisque la quantité de chaleur cédée en chaque point est plus grande.

Si l'on réalise un régime de marche tel que la quantité totale Q de chaleur transmise soit la même dans les deux cas, l'aire limitée par la nouvelle courbe et l'horizontale  $tt$  devra être égale à celle limitée par l'ancienne, et la nouvelle masse de gaz chauds mis en jeu sera plus faible.

La nouvelle courbe ( $T_0 + y, T - x$ ) devra donc nécessairement couper l'ancienne ( $T_0 T$ ) en un certain point intermédiaire P tel que les surfaces curvilignes ( $T_0 + y, P, T_0$ ) et ( $T, P, T - x$ ) soient égales.

La température ( $T - x$ ) des gaz à la sortie du faisceau tubulaire devra donc être d'autant moins élevée que ces gaz y pénétreront plus chauds.

C'est ce que confirme l'expérience (Voir Roszak, Etudes sur la chaleur).

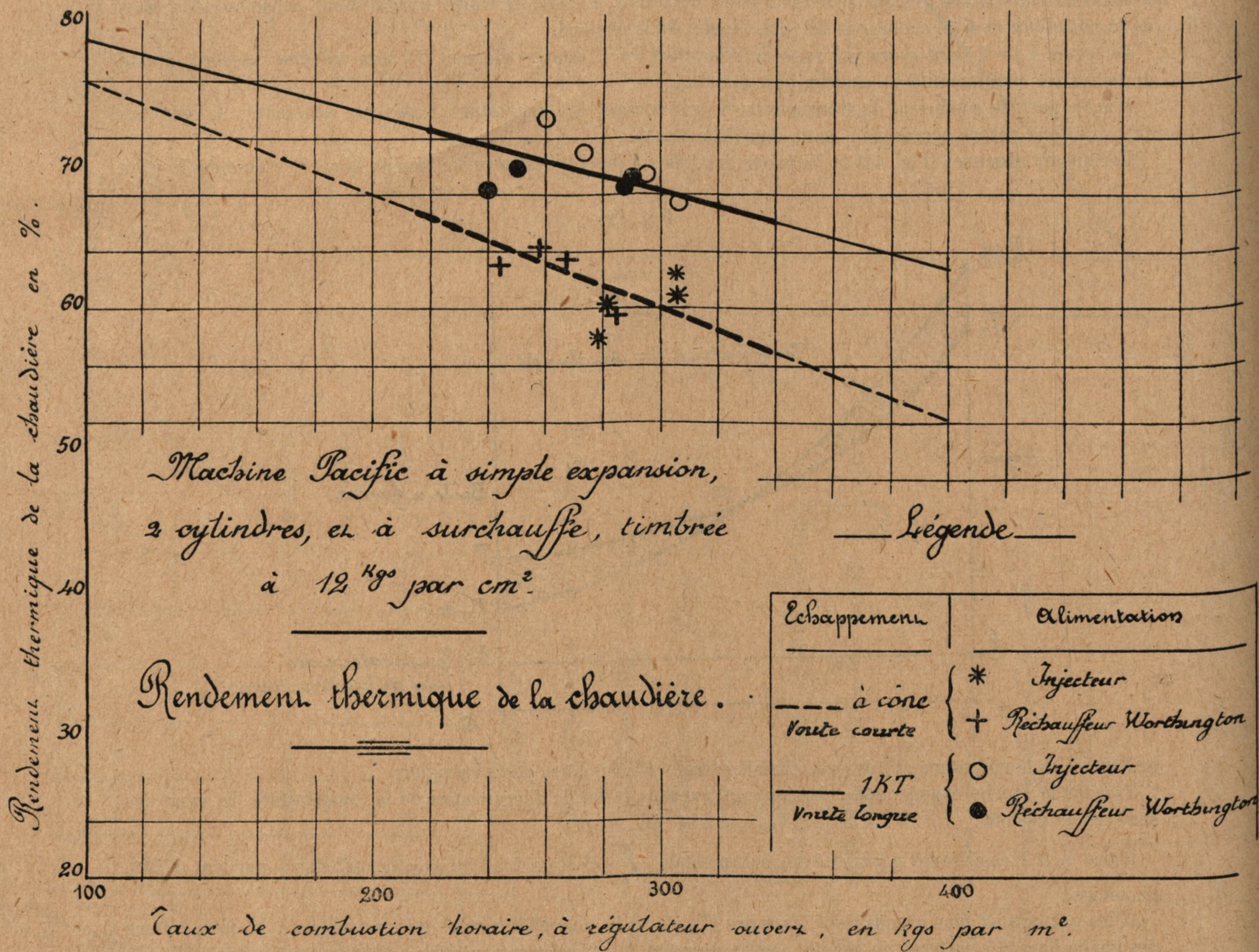
2° *Augmentation de la puissance de production de la chaudière.* — L'augmentation de puissance de production de la chaudière résulte :

1° De l'accroissement du taux de combustion horaire qu'il devient possible de réaliser grâce à la plus grande intensité du tirage ;

2° Du meilleur rendement thermique de la chaudière ;

Cette augmentation peut atteindre, suivant les cas, 15 à 25 % ; mais ces chiffres sont parfois nettement dépassés.

Fig. 45.



### III. — ENSEMBLE DE LA LOCOMOTIVE.

Enfin, si l'on considère une locomotive accomplissant un service déterminé, l'emploi des échappements 1 K/1 C ou 1 K/T permettra de réaliser en pleine marche :

a) Une économie de combustible pouvant atteindre 10 % aux allures moyennes et jusqu'à 20 % aux allures très poussées.

b) Une économie d'eau de 5 à 10 %.



On constatera, en outre, une amélioration très nette dans la facilité de conduite de la locomotive, surtout aux fortes allures de marche, la chauffe devenant plus aisée et le maintien du niveau de l'eau dans la chaudière plus facile.

Si l'on veut forcer le travail demandé à la locomotive, l'augmentation de puissance du mécanisme moteur jointe à l'augmentation de capacité de production de la chaudière permettra de le faire aisément, soit en augmentant les vitesses, soit en augmentant les charges, soit en augmentant, dans les limites permises, les deux à la fois.

La puissance continue de la locomotive pourra ainsi être majorée de 20 à 30 %, sans que l'on puisse d'ailleurs assigner à ce chiffre de limite précise, des augmentations supérieures ayant déjà été obtenues.

Enfin, à côté des avantages primordiaux qui viennent d'être cités, l'emploi des échappements 1 K/1 C ou 1 K/T en apporte d'autres qui ne sont pas sans intérêt et au nombre desquels on peut citer les suivants :

Une meilleure fumivoricité ;

Un moindre encrassement des tubes à fumée et la suppression presque complète du « birdnesting » ;

Une diminution de la production de fraisil dans la boîte à fumée (ce qu'on a déjà vu plus haut) ;

Une légère augmentation de la température de surchauffe, à activité égale de la combustion sur la grille ;

Un moindre encrassement de la grille permettant, le cas échéant, de prolonger les parcours avant la réfection des feux.

#### D. — EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS EN SERVICE SUR LE RÉSEAU DE PARIS A ORLÉANS AVEC DES LOCOMOTIVES MUNIES DES ÉCHAPPEMENTS 1 K/1 C OU 1 K/T.

1<sup>o</sup> *Machine Pacific compound à quatre cylindres et à surchauffe* (Fig. 25). — Le graphique de la figure 29 montre que la même machine, munie d'abord de l'échappement à trèfle, ensuite de l'échappement 1 K/T a pu, dans le premier cas, remorquer une charge de 515 t en soutenant une rampe de 10,6 et 5 ‰, une vitesse de 62,1 km/h sur un parcours de 29 km, la puissance moyenne indiquée atteignant dans ces conditions 1.865 cv et le niveau de l'eau dans la chaudière baissant des 8/10<sup>es</sup> de la longueur du tube indicateur, tandis que, dans le second cas, avec une charge remorquée de 501 t, la vitesse soutenue sur le même parcours a atteint 66.6 km/h, la puissance moyenne indiquée étant de 1.905 cv et le niveau de l'eau dans la chaudière n'ayant baissé que des 5/10<sup>es</sup> de la longueur du tube, malgré la plus grande puissance développée.

2<sup>o</sup> *Machine Pacific à simple expansion, deux cylindres et surchauffe* (Fig. 28 et 46). — Le graphique de la figure 30 montre que la même machine, munie d'abord de l'échappement à cône mobile, ensuite de l'échappement 1 K/T a pu, dans le premier cas :

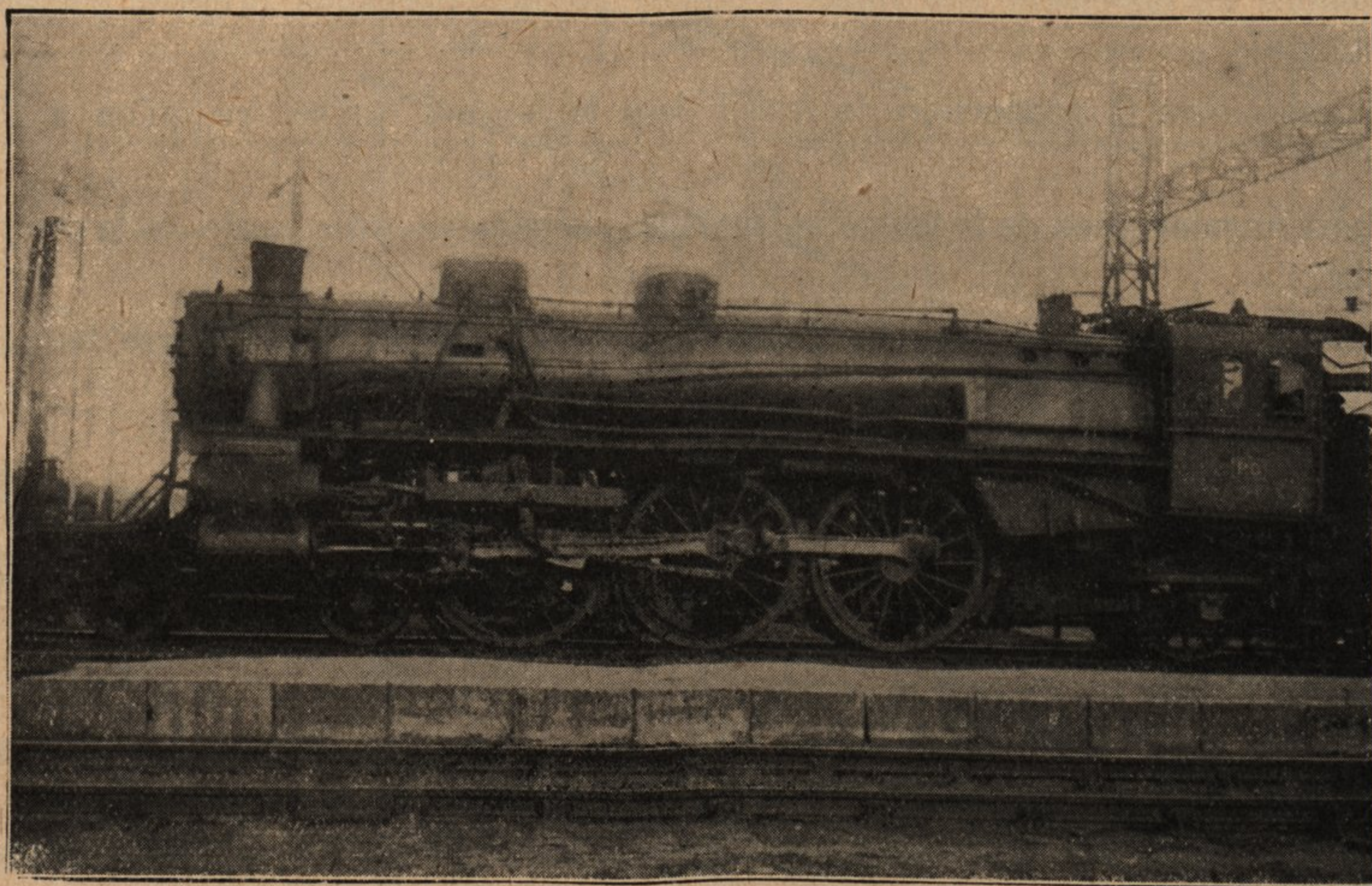
Remorquer une charge de 505 t en soutenant en rampe de 1 à 2 ‰ une vitesse moyenne de 75,5 km/h sur un parcours de 34 km, la puissance moyenne indiquée atteignant dans ces conditions 1.300 cv et le niveau de l'eau dans la chaudière baissant des 4,7/10<sup>es</sup> de la longueur du tube indicateur, tandis que, dans le second cas, avec une charge remorquée de 491 t, la

vitesse soutenue sur le même parcours a atteint 92,6 km/h, la puissance moyenne indiquée étant de 1.540 cv et le niveau de l'eau restant constant dans la chaudière.

La même machine munie de l'échappement 1 K/T a pu remorquer de St-Pierre-des-Corps à Paris (230 km) un train de 570 t en regagnant 27 minutes sur l'horaire (train tracé à la vitesse nominale de 75 km/h) ce qui correspond à une vitesse nominale de 90 à 95 km/h, en ne dépensant que 1 kg,45 de charbon (allumage déduit) par cvh utile développé au crochet du tender (machine alimentée par pompe Worthington), tandis qu'avec l'échappement à cône la même machine (toujours alimentée avec la pompe Worthington), dépensait 1 kg,74 par cvh utile en remorquant des charges de 500 t et en ne regagnant que deux à trois minutes sur l'horaire.

L'économie de combustible par cvh utile atteint dans ce cas 16,65 % (allumage déduit).

Fig. 46. — MACHINE PACIFIC A SIMPLE EXPANSION 2 CYLINDRES  
ET SURCHAUFFE MUNIE DE L'ÉCHAPPEMENT 1 K/T.



Le tableau ci-après résume, d'autre part, les principaux résultats obtenus dans le cas de l'alimentation par injecteur.

On voit que l'économie de combustible par cheval utile développé au crochet du tender a pu atteindre le chiffre très élevé de 18,4 % allumage déduit et de 17,3 % allumage compris.

Comme il a déjà été signalé plus haut, un essai d'échappement 1 K/T variable (Fig. 17) a également été fait sur la même locomotive ; les résultats tant du point de vue de la variabilité de l'échappement (Fig. 47) que de la puissance développée par la locomotive (Fig. 48) ont été particulièrement remarquables.

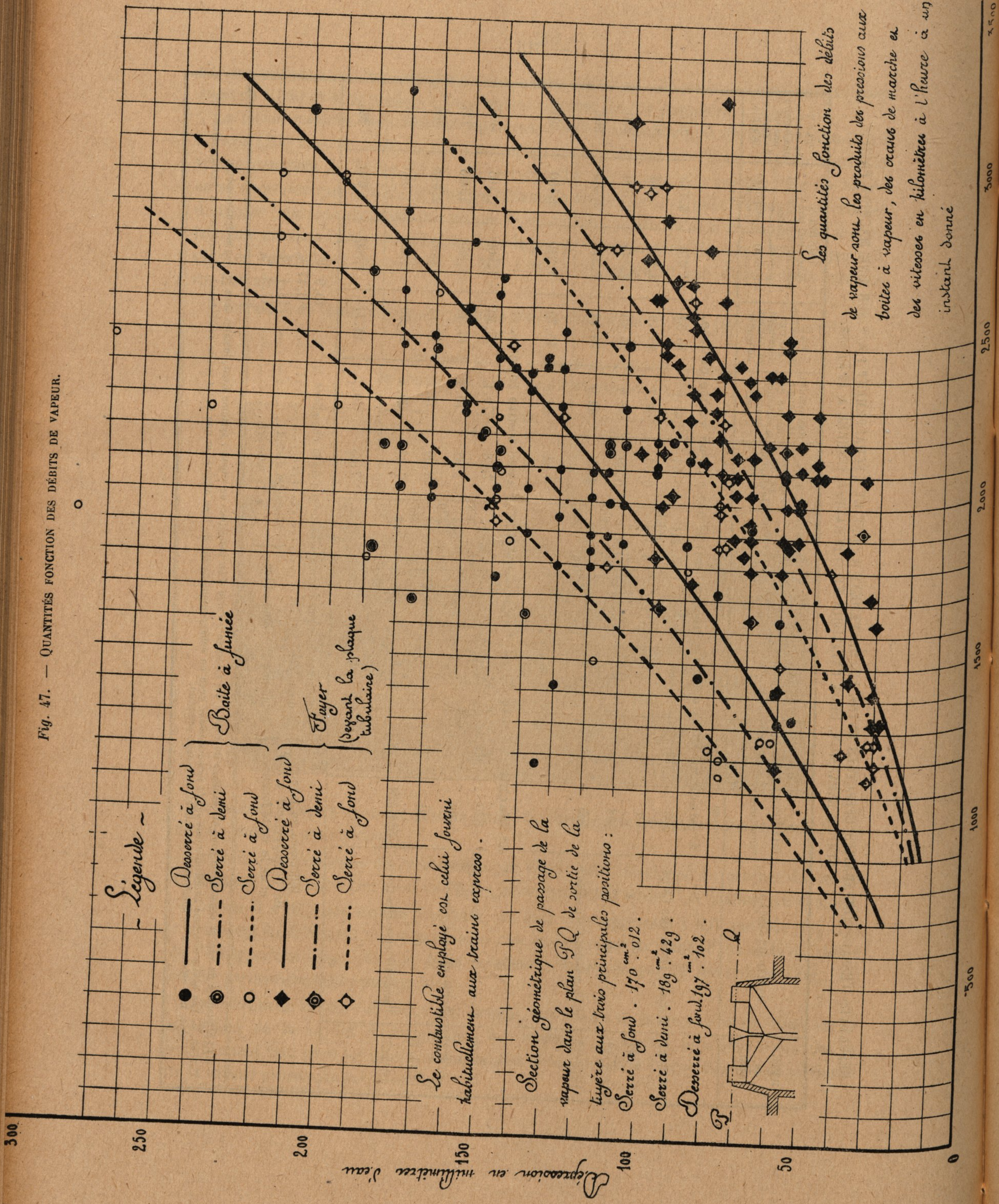
Les courbes de la figure 47 montrent, en effet, que le gain de tirage obtenu en faisant varier la section de la tuyère d'échappement est supérieur pour les variations moyennes et sensiblement égal pour les plus grandes au gain théorique dû à l'accroissement de la vitesse de la vapeur provoquée par le serrage.

**RÉSULTATS D'ESSAIS COMPARATIFS EFFECTUÉS ENTRE L'ÉCHAPPEMENT A CÔNE ET L'ÉCHAPPEMENT 1 K/T SUR UNE MACHINE PACIFIC  
A SIMPLE EXPANSION, DEUX CYLINDRES ET SURCHAUFFE TIMBRÉE A 12 kg/cm<sup>2</sup>.**

DATE de l'essai	PARCOURS : 230 km	CHARGES remorquées tonnes	VITESSE moyenne à régulateur ouvert km/h	TRAVAIL développé au crochet du tender cv/h	EAU consommée chauffage du train déduit (1) litres	CHARBON consommé allumage et chauffage du train déduits kg	EAU vaporisée par kg de charbon brûlé litres	RENDEMENT thermique moyen de la chaudière pendant l'essai %	EAU consommée par cv/h développé au crochet du tender litres	CHARBON consommé par cv/h développé au crochet du tender allumage déduit compris kg	TAUX de combustion horaire par m <sup>2</sup> de surface de grille kg		
<b>1° Machine munie de l'échappement à cône avec voûte courte.</b>													
8/2/27	Paris-St-Pierre-des-Corps..	505	72,9	1.868	29.030	4.244 Allumage 303	6.82	64.0	15.53	2.270	2,435	307	
25/2/27	d°	501	69,2	2.021	31.171	4.518 All. 322	6.90	62.7	15.42	2.235	2,393	307	
11/2/27	d°	508	71,7	1.638	26.171	3.970 All. 328	6.60	58.0	15.99	2.425	2,620	280	
12/2/27	St-Pierre-des-Corps-Paris..	505	68,9	1.672	26.988	3.870 All. 283	6.96	62.0	16.12	2.315	2,483	282	
				Moyennes.....			6.84	64.0	15.79	2.310	2,480	294	
<b>2° Machine munie de l'échappement 1 K/T avec voûte longue.</b>													
5/4/27	Paris-St-Pierre-des-Corps..	520	72,6	2.231	34.317	4.362 All. 334	7.88	70.1	15.40	1.960	2,105	307	
6/3/27	St-Pierre-des-Corps-Paris..	489	73,6	1.903	27.826	3.554 All. 300	7.82	70.5	14.60	1.868	2,025	276	
9/4/27	d°	491	75,1	1.698	25.692	3.217 All. 306	8.00	73.2	15.13	1.893	2,075	261	
12/4/27	Paris-St-Pierre-des-Corps..	554-528	78,0	2.170	30.388	3.962 All. 367	7.67	69.3	14.00	1.828	1,996	297	
				Moyennes.....			7.85	70.7	14.77	1.885	2,050	285	
<table border="0" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; vertical-align: top;">                 Différence en faveur de l'échappement 1 K/T et de la voûte longue.             </td> <td style="width: 30%; vertical-align: top;">                 Augmentation du rendement thermique de la chaudière ..... 15,9 %                  Economie d'eau ..... 6,47 %                  Economie de combustible. { Allumage déduit ..... 18,4 %                  » compris ..... 17,3 %             </td> </tr> </table>												Différence en faveur de l'échappement 1 K/T et de la voûte longue.	Augmentation du rendement thermique de la chaudière ..... 15,9 % Economie d'eau ..... 6,47 % Economie de combustible. { Allumage déduit ..... 18,4 % » compris ..... 17,3 %
Différence en faveur de l'échappement 1 K/T et de la voûte longue.	Augmentation du rendement thermique de la chaudière ..... 15,9 % Economie d'eau ..... 6,47 % Economie de combustible. { Allumage déduit ..... 18,4 % » compris ..... 17,3 %												

(1) La quantité de vapeur consommée pour le chauffage du train a été mesurée à l'aide d'un indicateur de vapeur, système Kent, installé dans le wagon-dynamomètre.  
N.-B. — Les essais effectués antérieurement sur la même machine avec un échappement Kjälä du type original et une voûte courte avait donné, par rapport à l'échappement à cône, une économie de combustible de 9,98 % (allumage compris).

Fig. 47. — QUANTITÉS FONCTION DES DÉBITS DE VAPEUR.



300  
250  
200  
150  
100  
50  
0

500 1000 1500 2000 2500 3000 3500

Ce gain théorique est, en effet, donné par la relation :

$$\frac{h}{h'} = \left( \frac{\omega'}{\omega} \right)^2$$

où  $h$ ,  $h'$ ,  $\omega$ ,  $\omega'$  sont respectivement les dépressions et les sections avant et après serrage de l'échappement.

Or, si nous considérons ce qui a lieu, par exemple, pour un débit de vapeur proportionnel au chiffre 2.000 (Fig. 47), on voit qu'en passant de la position desserrée à fond à la position serrée à demi la dépression passe de 110 mm à 128 mm d'eau, alors que d'après la variation correspondante de la section de la tuyère, cette dépression n'aurait dû passer que de 110 à :

$$110 \times \left( \frac{197,1}{189,43} \right)^2 = 119 \text{ mm}$$

Il y a donc eu pendant cette première partie du serrage un accroissement du rendement de l'échappement. On avait justement cherché à réaliser cette condition de manière à compenser, dans toute la mesure du possible, la perte de rendement énergétique subie par l'échappement lorsque, toutes choses égales d'ailleurs, la vapeur s'échappe de la tuyère avec une vitesse de plus en plus grande.

On voit qu'entre les positions « serré à fond » et « serré à demi » ce but a été dépassé.

En passant maintenant de la position « serré à demi » à la position « serré à fond » on voit que la dépression croît de 128 à 152 mm, alors que, d'après la théorie, ce gain aurait dû être de :

$$128 \times \left( \frac{189,43}{170,01} \right)^2 = 157,5 \text{ mm}$$

Même en serrant l'échappement à fond on obtient donc encore un accroissement de la dépression qui reste très voisin de l'accroissement théorique.

Il y a dans ces constatations un fait nouveau, les différents types d'échappements variables utilisés jusqu'ici donnant, quand on les serre, un gain de tirage inférieur au gain théorique.

Les graphiques de la figure 48 montrent que, munie de cet échappement variable, la locomotive a pu remorquer :

1° Un train rapide de 334 tonnes tracé à la vitesse nominale de 90 kmh en regagnant 28 minutes sur l'horaire sur un parcours de 214 km.

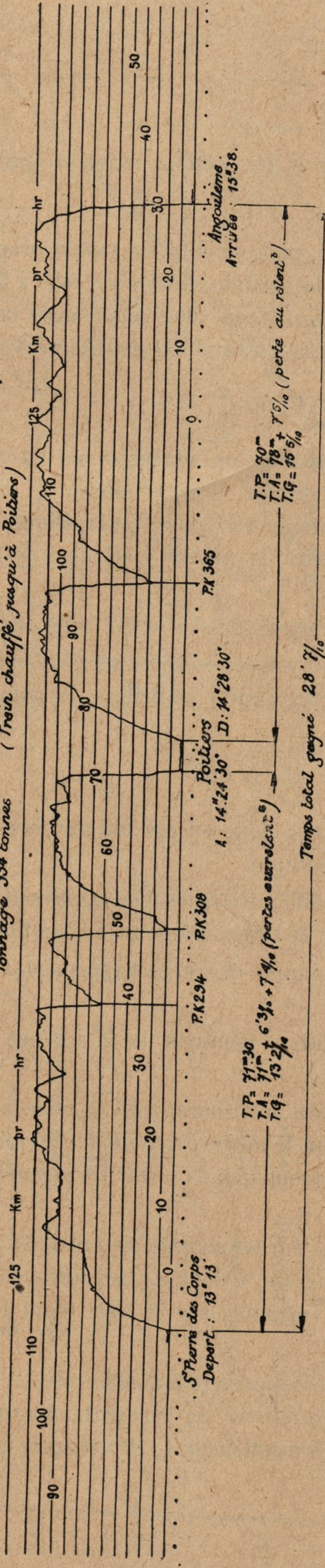
2° Un train express de 650 tonnes (charge limite antérieure : 585 t) tracé à la vitesse nominale de 75 kmh en regagnant 16 minutes sur le même parcours de 214 km. On a pu constater que la vaporisation était très abondante (soupapes de sûreté fréquemment levées) même avec l'échappement complètement desserré.

3° *Machine Consolidation compound à 4 cylindres à vapeur saturée, timbrée à 16 kg/cm<sup>2</sup>.* — Essayée successivement, d'abord munie de l'échappement à double valve, ensuite de l'échappement 1 K/1 C, on a pu faire les constatations suivantes sur la ligne dont le profil est reproduit figure 49.

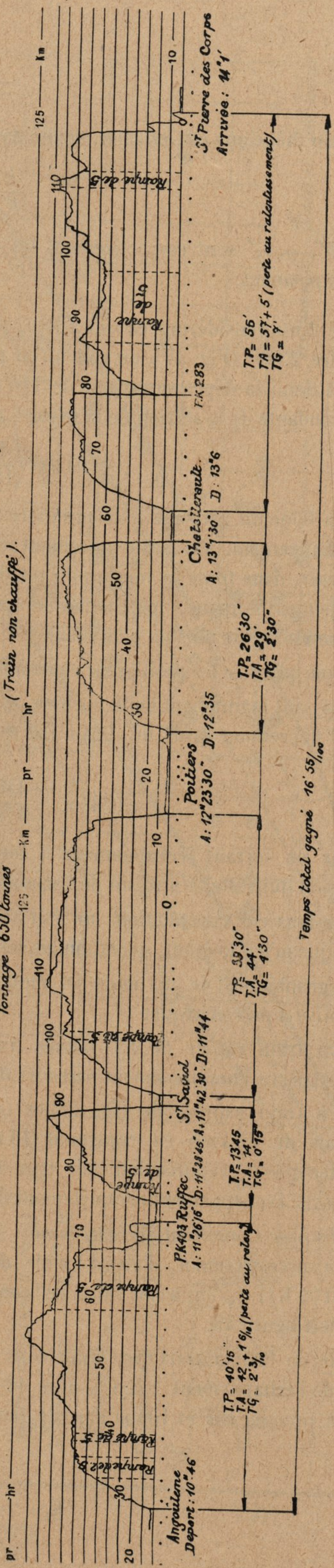
Partis de Châteauroux avec 655 t dans le cas de l'échappement à double valve et 642 t dans le cas de l'échappement 1 K/1 C avec 12 cm d'eau au-dessus du repère du niveau minimum dans le premier cas et 10 cm dans le second, nous constatons que, 16 km après Lothiers, ce

Fig. 48. — ESSAIS FAITS SUR UNE LOCOMOTIVE PACIFIC 2 CYLINDRES ET SURCHAUFFE MUNIE D'UN ÉCHAPPEMENT 1 K/T VARIABLE A AMORCES DE BARRETTES.

**Train 7 du 4 Novembre 1927 (Vitesse nominale 90 km)**  
 Tonnage 334 tonnes (Train chauffé jusqu'à Poitiers)



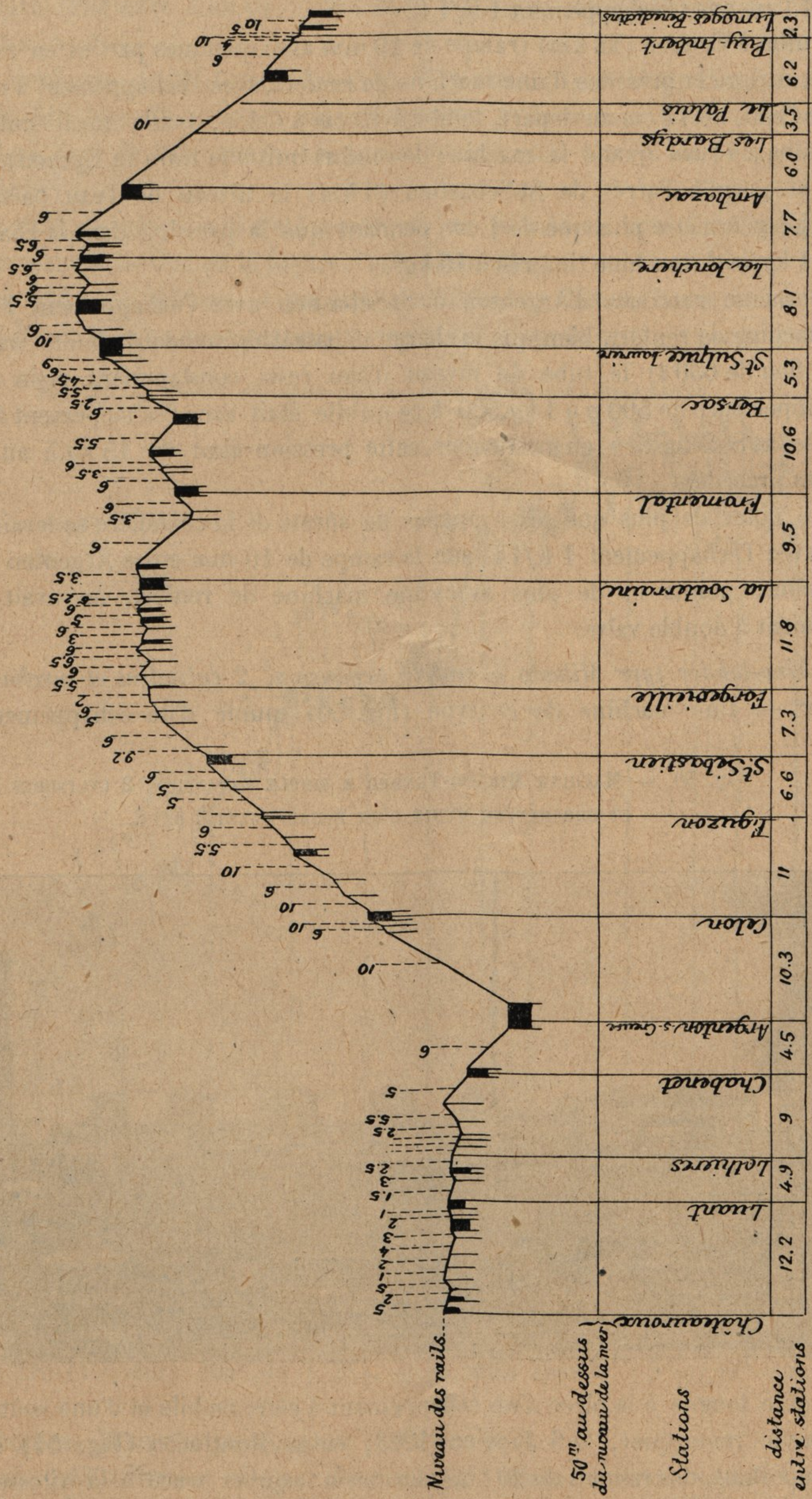
**Train 4 du 5 Novembre 1927 (Vitesse nominale 75 km)**  
 Tonnage 650 tonnes (Train non chauffé)



Legende  
 T.P. signifie Temps Passé  
 T.A. " " Temps Alloué  
 T.G. " " Temps Gagné

Nota  
 Les pertes de temps aux ralentissements ont été déterminées en prenant comme base les vitesses calculées d'après les marches types.

Fig. 49. — PROFIL EN LONG DE LA LIGNE CHATEAUX-ROUX-LIMOGES.



niveau était tombé à 3 *cm* avec l'échappement à double valve et qu'il était, au contraire, monté à 13 *cm* avec l'échappement 1 K/1 C.

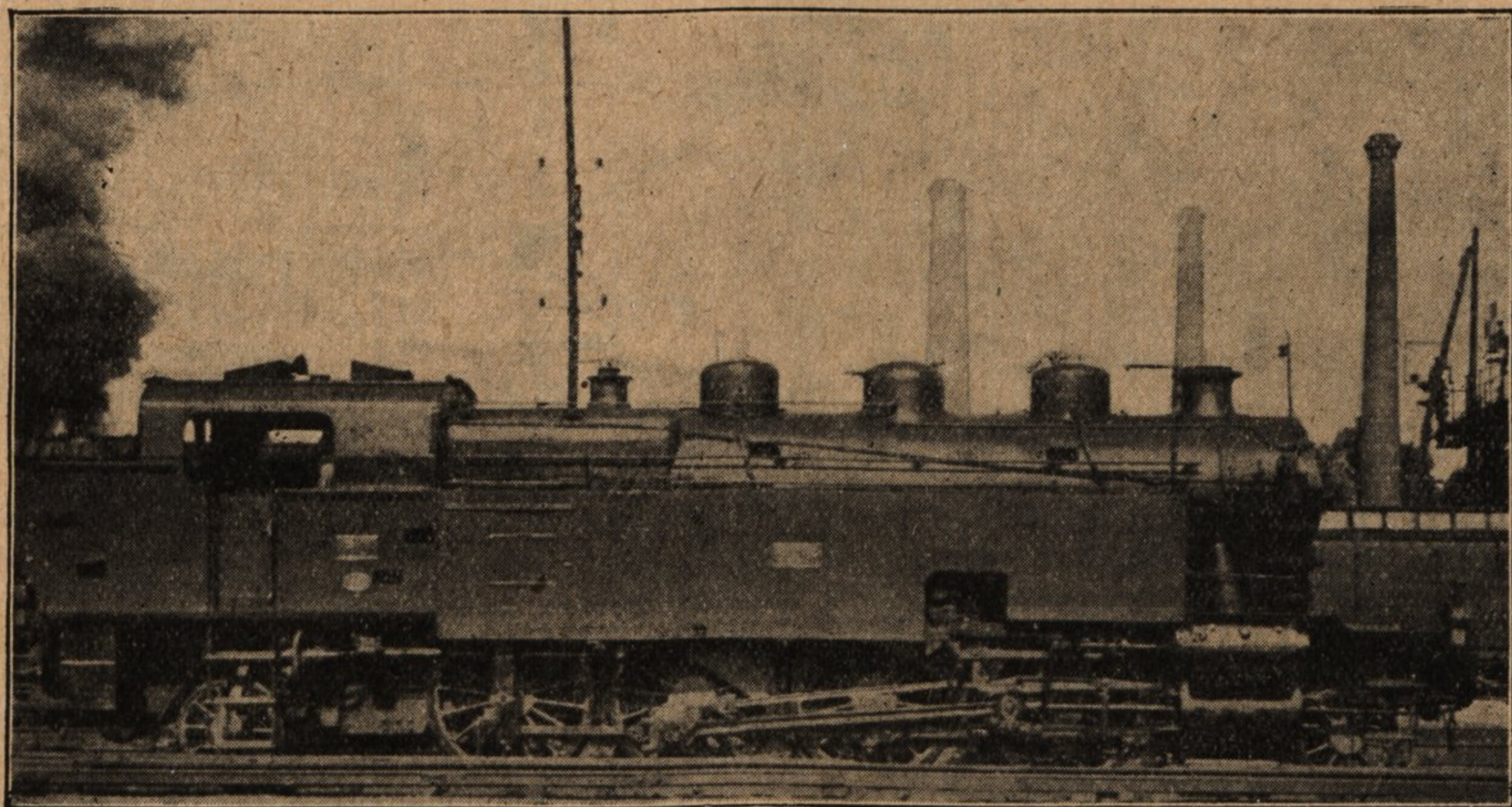
D'Argenton à Eguzon (22 *km*) (rampe de 10 *mm* avec quelques parties en rampe de 6 *mm* et 5 *mm*), malgré la présence d'une machine de renfort, avec l'échappement à double valve, le niveau de l'eau, de 14 *cm* au départ, tomba à 10 *cm* à Celon, oscilla ensuite entre 14 et 12 *cm* puis retomba à 11 *cm* quand la machine de renfort quitta le train (à Eguzon). A partir de ce moment et jusqu'à l'arrêt de St-Sébastien (6 *km*) le niveau de l'eau baissa d'une façon continue jusqu'à n'être plus que de 1 *cm* pendant que la pression dans la chaudière tombait de 14 à 11 *kg/cm*<sup>2</sup> (machine timbrée à 16 *kg*).

Sur ce même parcours d'Argenton à St-Sébastien avec l'échappement 1 K/1 C et sans aucune machine de renfort, bien que la charge dépassât légèrement la limite maximum d'hiver (642 *t* au lieu de 630 *t*) le tube de niveau d'eau resta constamment plein et la pression toujours supérieure de 500 *g* à 1 *kg*,500 à ce qu'elle était avec l'échappement à double valve. A l'arrivée à St-Sébastien en particulier, cette pression était de 15 *kg*,5 au lieu de 11 *kg* dans le cas précédent.

On peut noter de plus que les soupapes de sûreté de la chaudière se levaient à plusieurs reprises avec l'échappement 1 K/1 C sur la rampe de 10 *mm* entre Argenton et Celon, alors qu'aux mêmes points et de plus avec une machine de renfort, on avait 14 *kg*,5 avec l'échappement à double valve.

4° *Machine-tender type Mikado à simple expansion, 2 cylindres et surchauffe, timbrée à 12 kg/cm*<sup>2</sup>. — Une machine de ce type (Fig. 50) munie d'un échappement de 1 K/1 C

Fig. 50. — MACHINE MIKADO-TENDER A SIMPLE EXPANSION, 2 CYLINDRES  
ET SURCHAUFFE MUNIE D'UN ÉCHAPPEMENT 1 K/1 C.



et d'une voûte longue à la place d'un échappement à cône mobile et d'une voûte de longueur moyenne a pu remorquer, le 6 Janvier 1928, entre Montluçon (Fig. 51) et Eygurande (ligne comportant des rampes de 20 ‰), un train express tracé à la vitesse nominale de 55 *kmh* et chargé à 312 *t*, alors que la charge limite de ces machines était précédemment de 215 *t*.



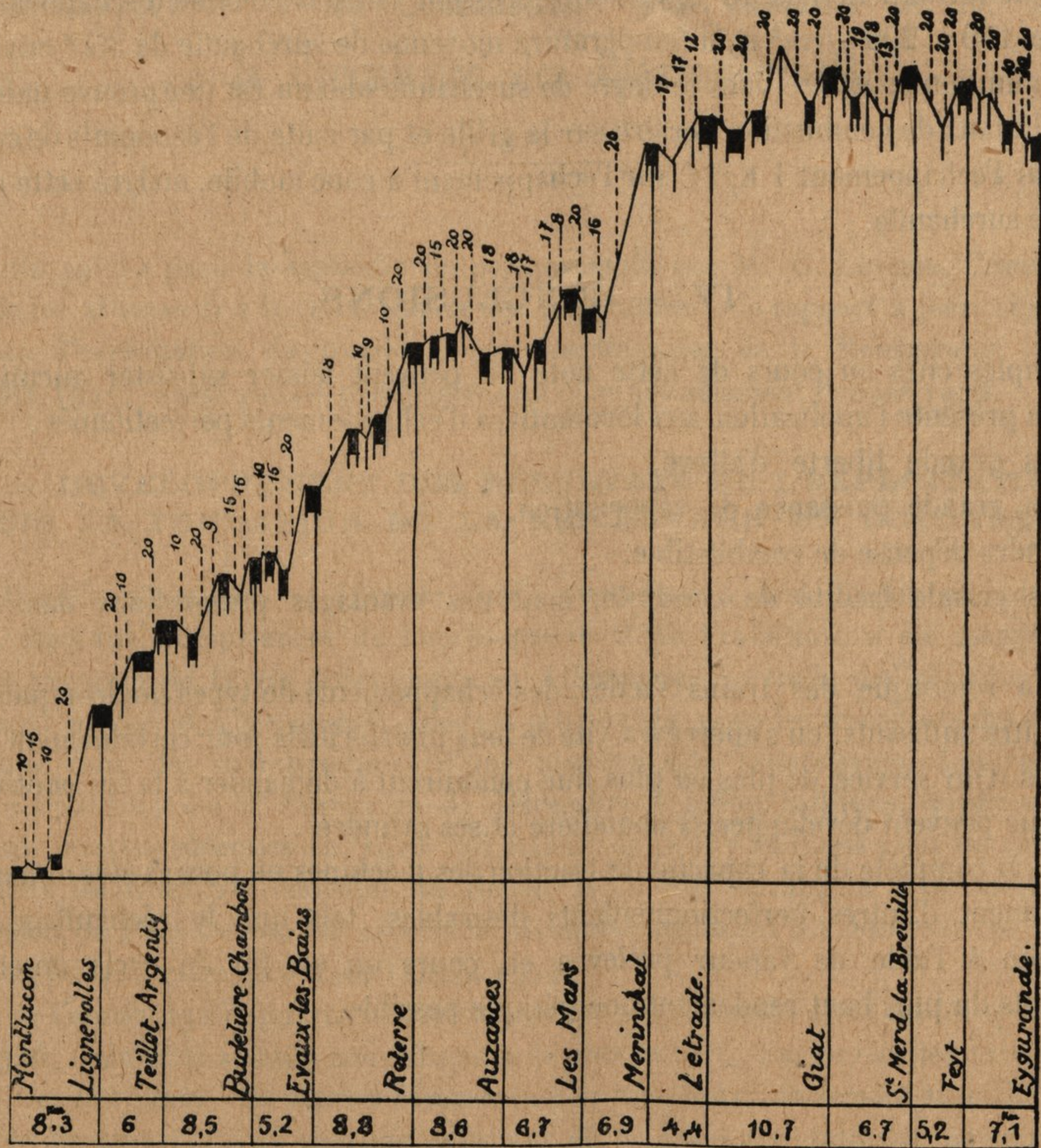
La température extérieure était de  $-3^{\circ}\text{C}$  et le train était chauffé d'une façon continue à la pression de  $5\text{ kg/cm}^2$ .

Malgré une surcharge de  $97\text{ t}$ , soit de  $45\%$ , il a été regagné cinq minutes sur l'horaire dans la partie la plus dure du parcours entre Montluçon et Auzances. L'eau a été maintenue à un niveau élevé dans le tube sur tout le parcours sans qu'il ait été fait usage des outils à feu ni du souffleur.

Le 7 Janvier 1928, le même train a été remorqué par la même machine après que l'on eût augmenté légèrement la section de la tuyère d'échappement.

La charge de  $333\text{ t}$  (9 voitures) a pu être remorquée en faisant l'heure facilement sur la partie la plus dure de la ligne et en regagnant cinq minutes sur le reste du parcours.

Fig. 51. — PROFIL EN LONG DE LA LIGNE MONTLUÇON-EYGURANDE.



La température extérieure était de  $+3^{\circ}\text{C}$  et le train chauffé à  $5\text{ kg/cm}^2$  d'une manière continue.

Dans ce second cas, la surcharge atteignait  $118\text{ t}$  soit  $55\%$ .

Ces trains sont habituellement faits par des machines Decapod à tender séparé Compound à 4 cylindres et à surchauffe, timbrées à  $16\text{ kg/cm}^2$ , ayant une surface de grille de  $3\text{ m}^2,80$  au lieu de  $2\text{ m}^2,73$  seulement pour les machines Mikado ci-dessus.

Le combustible utilisé était le même que celui délivré aux machines Decapod.

L'augmentation de puissance ainsi obtenue permettra, dans de nombreux cas, de supprimer la double traction, ce qui constitue, du point de vue économique, un avantage important.

Nous arrêterons ici la liste des résultats obtenus avec les échappements 1 K/1 C et 1 K/T, nous bornant simplement à signaler que leur application s'est faite avec un égal succès sur plusieurs autres séries de machines et en particulier sur des machines Ten-Wheel et Mikado où l'emploi de volets destinés à relever le degré de surchauffe par obturation des petits tubes (Schleupfer-Junod) avait rendu la vaporisation des plus difficile.

Sur ces dernières machines en particulier, le changement de régime dans le fonctionnement de la machine a été tel que là où, avec l'échappement à cône mobile, l'introduction devait être de 55 %, correspondant à une contrepression dans la colonne d'échappement de 600 à 800 gr par  $cm^2$  et à une température moyenne de surchauffe de 375°, avec l'échappement 1 K/1 C il suffisait d'une introduction de 40 %, la contrepression dans la colonne d'échappement n'étant plus que de 150 à 200  $g/cm^2$  et la température moyenne de surchauffe de 350° environ.

Cette diminution constatée dans le degré de surchauffe obtenu est une preuve indirecte de la réduction du taux de combustion horaire sur la grille et par suite de l'économie de combustible procurée par l'échappement 1 K/1 C sur l'échappement à cône mobile, malgré cette diminution du degré de surchauffe.

#### IV. — CONCLUSIONS.

Les exemples cités au cours de cette note ne peuvent laisser subsister aucun doute sur l'intérêt que présente l'application aux locomotives d'échappements perfectionnés :

- Une plus grande liberté d'allure,
- Une plus grande puissance de vaporisation,
- Une moindre dépense de combustible,

Une plus grande facilité de conduite, sont des avantages primordiaux dans un service de traction.

Si, dans la remorque des trains faciles, des échappements de types quelconques pourront encore paraître suffisants, on s'apercevra vite de leur infériorité le jour certainement proche où les exigences d'un service de plus en plus dur conduiront à demander à la locomotive toute la puissance que peuvent développer sa chaudière et ses cylindres.

L'utilisation complète de la capacité de traction des machines ne pourra être obtenue que si, indépendamment d'autres perfectionnements désirables, tels que le réchauffage de l'eau d'alimentation à l'aide de vapeur prélevée en cours ou en fin de cycle, on emploie des échappements du plus haut rendement énergétique possible.

---