

CHAPITRE IX

ÉCHAPPEMENT

1° Nécessité d'un tirage forcé sur la chaudière de locomotive

Après avoir travaillé dans le moteur, la vapeur est rejetée à l'atmosphère. Les locomotives n'emploient pas de condenseur comme les machines fixes; cet appareil encombrant serait lourd à transporter et l'on perdrait d'un côté ce que l'on pourrait gagner de l'autre en augmentant le rendement par abaissement de la température de la source froide à une valeur inférieure à celle de 100° qui correspond à la condensation à l'air libre.

Mais sur son trajet d'évacuation à l'atmosphère, la vapeur doit encore fournir un travail supplémentaire pour créer le tirage nécessaire à la combustion complète dans le foyer et vaincre la résistance offerte par la couche de charbon et les tubes à fumée au passage de l'air et des gaz brûlés.

Nous avons déjà indiqué dans le chapitre qui traite des tubes à fumée comment on peut se rendre compte de la résistance qu'ils offrent au passage des gaz. Nous avons vu qu'il fallait leur donner une longueur suffisante pour obtenir une valeur convenable de la chaleur cédée par eux à l'eau à vaporiser et pour réduire au minimum la température des gaz qui arrivent dans la boîte à fumée et qui vont perdre dans l'atmosphère le reste des calories emmenées. Cette longueur, qui atteint 6 mètres sur beaucoup de machines, crée une résistance que l'on ne peut diminuer qu'en augmentant la section de passage des gaz par multiplication du nombre de tubes. Et dans cette voie on est limité par des raisons d'encombrement du corps cylindrique qui, dans les machines modernes, occupe toute la place que lui laisse le gabarit de la voie et dont le diamètre ne peut plus être agrandi.

On peut voir facilement que le tirage naturel obtenu par la seule différence de hauteur entre le point de sortie des gaz de la cheminée et le point d'entrée de l'air frais dans le cendrier n'a aucun effet pour vaincre cette résistance de passage des gaz.

En effet, cette dénivellation H est environ de 3 m. 500. Si on admet une température moyenne des gaz de 1.000°, chiffre supérieur à la réalité, on voit que la densité moyenne d des gaz chauds est en admettant une densité égale des gaz et de l'air à la même température.

$$d = \frac{d_0}{1 + \alpha t} = \frac{d_0}{1 + 1.000} = \frac{d_0}{\frac{273}{4,66}}$$

soit sensiblement 4,66 fois plus petite que celle de l'air environnant d' . La différence de pression que provoquerait le tirage serait égale à :

$$f = H (d-d') = 3,5 \left(1,3 - \frac{1,3}{4,66} \right) \text{ kg/m}^2 = 3,59 \text{ kg/m}^2$$

ou encore 3,59 mm. d'eau; alors qu'il faut : 100 à 200 mm. pour les 141 P (1.800 CV au crochet pour 200 mm.) — 50 à 150 mm. pour les pacifiques en utilisation courante (1.000 CV au crochet pour 150 mm.) — 100 à 200 mm. pour la 141 E (puissance moyenne 1.000 CV).

On est donc amené à provoquer un tirage artificiel.

2^o Principe du système de tirage forcé par injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée.

Pour réaliser le tirage forcé, Marc Seguin avait pensé à l'emploi de ventilateurs soufflant l'air sous la grille. Ils ont l'inconvénient de provoquer une surpression dans le foyer et des retours de flammes lors de l'ouverture de la porte pour les chargements. Des ventilateurs aspirants dans la boîte à fumée ont également été essayés.

Mais les ventilateurs, quoique de bon rendement, n'ont pas pu survivre à la concurrence du système inventé en 1802 par l'ingénieur américain Trewithick. Ce système, parmi d'autres qualités, possède surtout celle de la simplicité évitant tout entretien. Il consiste à injecter dans la cheminée la vapeur qui s'échappe des cylindres après avoir fourni le travail moteur de détente.

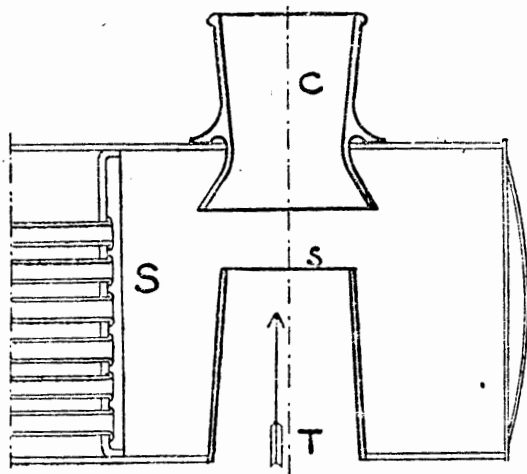


FIG. 150

À la sortie du cylindre la vapeur possède encore un peu de pression nécessaire pour son expulsion dans l'atmosphère. Elle s'échappe par un tuyau situé à l'intérieur de la boîte à fumée dans l'axe de la cheminée. L'ensemble forme un système analogue aux injecteurs et la vapeur entraîne avec elle les gaz se trouvant dans la boîte à fumée.

La figure 150 montre le schéma de fonctionnement de ce système de tirage. La vapeur arrive par la tuyère T de section s avec une vitesse V , elle est lancée dans la cheminée C dont la section est S et y entraîne les gaz situés dans la boîte à fumée venus par les tubes dont

la section totale est S et avec une vitesse v . Le mélange de vapeur et de gaz se fait à l'entrée de la cheminée et crée une dépression dans la boîte à fumée; c'est cette dépression h qui crée le tirage. Les gaz du foyer sont poussés dans les tubes par l'excès de la pression atmosphérique qui agit à l'entrée du cendrier sur la pression dans la boîte à fumée qui règne à la sortie du faisceau tubulaire. La force vive de la vapeur sortant de la tuyère d'échappement et entraînant les gaz brûlés dans la cheminée sert à vaincre l'excès de la pression atmosphérique agissant à la sortie de la cheminée sur la pression dans la boîte à fumée qui agit à la base de la cheminée. Cette différence de pression a tendance à refouler les gaz et la vapeur de l'extérieur vers l'intérieur de la boîte à fumée; il faut donc une action opposée pour que les gaz sortent dans l'atmosphère extérieure.

Nous allons voir par quel mécanisme est produit cet entraînement.

La théorie de l'échappement a d'abord été établie par Zeuner en 1863. Elle s'appuie sur des hypothèses simplificatrices relatives au comportement des gaz et de la vapeur dans leur trajet et sur la façon dont se fait le mélange de la vapeur et des gaz au moment de l'entraînement. Malgré les simplifications dues à ces hypothèses, cette théorie reste encore assez compliquée.

On peut voir d'une façon plus simple ce qui se passe dans la boîte à fumée en appliquant la méthode de Bouilvin exposée dans son cours de Mécanique appliquée aux machines.

Pour cela on se base sur une donnée expérimentale que Zeuner a retrouvée théoriquement en supposant que la densité des gaz brûlés reste constante pendant tout leur trajet du foyer à la boîte à fumée.

On admet que le débit des gaz est, pour une chaudière donnée, proportionnel à la racine carrée de la dépression dans la boîte à fumée :

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

- Q étant le volume de gaz débité pendant 1 seconde.
- h, la dépression dans la boîte à fumée, c'est-à-dire, la différence entre la pression atmosphérique et la pression dans la boîte à fumée.
- T est un coefficient qui dépend de la résistance que les gaz rencontrent au passage depuis l'entrée de l'air dans le cendrier jusqu'à la sortie du faisceau tubulaire. Ce coefficient appelé *tempérament*, est une constante qui caractérise la chaudière. Plus il est élevé, moins la résistance opposée à la circulation des gaz est grande; une chaudière de grand tempérament est une chaudière dont le tirage est facile et ne nécessite pas une grande dépression dans la boîte à fumée. Ce coefficient n'est cependant pas rigoureusement constant pour une chaudière donnée, si on fait varier les conditions de chargement. Il est évident qu'avec une forte épaisseur de charbon sur la grille, l'air rencontre une plus grande résistance au passage qu'avec un feu mince. Dans le premier cas le tempérament est plus petit que dans le second. Mais nous ferons notre raisonnement en admettant que les conditions de chargement ne varient pas et, par suite, que le tempérament est constant. Nous appellerons :
 - s, la section de passage de la vapeur sortant de l'échappement,
 - V la vitesse moyenne de la vapeur sortant de l'échappement mesurée positivement de bas en haut,
 - S la section de passage total des gaz à travers le faisceau tubulaire,
 - v la vitesse moyenne des gaz sortant du faisceau tubulaire,
 - α la section de passage du mélange gaz et vapeur dans la cheminée cylindrique,
 - w, la vitesse du mélange dans la cheminée mesurée positivement de bas en haut,
 - γ la masse spécifique moyenne des gaz brûlés dans la boîte à fumée,
 - δ la masse spécifique moyenne de la vapeur qui sort de la tuyère d'échappement.

Examinons ce qui se passe dans la cheminée. La colonne gazeuse qui s'y trouve est soumise à une force due à la différence entre la pression extérieure et la pression intérieure à la boîte à fumée. Cette force est dirigée de haut en bas, tend à faire rentrer la colonne gazeuse dans la boîte à fumée et vaut αh en valeur absolue.

Pendant une seconde la colonne gazeuse absorbe de la vapeur d'échappement et des gaz brûlés. La quantité de vapeur qui pénètre dans la cheminée par seconde est $\delta s V$ et la quantité de gaz brûlés est $\gamma S v$. Pendant le même temps la colonne gazeuse perd en haut de la cheminée une quantité de mélange gaz et vapeur qui vaut $(\delta s V + \gamma S v)$, car on peut admettre que la pression dans cette colonne reste constante en moyenne et, par conséquent, que la quantité de gaz qui sort est égale à celle qui entre.

La quantité de mouvement que la vapeur d'échappement apporte chaque seconde à cette colonne en y pénétrant avec la vitesse V est : $\delta s V^2$.

La quantité de mouvement que les gaz apportent chaque seconde est $\gamma S v^2$.

La quantité de mouvement que le mélange gaz-vapeur emporte en sortant par le haut de la cheminée est :

$$(\delta s V + \gamma S v) w$$

Donc, par seconde la colonne gagne au total, la quantité de mouvement :

$$\delta s V^2 + \gamma S v^2 - (\delta s V + \gamma S v) w$$

qu'elle reçoit de l'extérieur.

On sait que la somme de cette quantité de mouvement reçue de l'extérieur et de la résultante des forces extérieures doit être égale à l'accroissement de quantité de mouvement de la colonne. Or, comme la vitesse moyenne de la colonne et son poids restent constants, sa quantité de mouvement ne varie pas. La résultante des forces extérieures est due uniquement à la dépression dans la boîte à fumée et vaut :

— αh mesurée suivant un axe positif dirigé de bas en haut comme pour les vitesses de la vapeur et des gaz.

On a donc l'équation :

$$(1) \quad \delta s V^2 + \gamma S v^2 - (\delta s V + \gamma S v) w - \alpha h = 0$$

Pour transformer cette équation, nous allons remplacer h par sa valeur donnée en fonction du débit de gaz brûlés par la relation qui définit le tempérament de la chaudière.

$$h = \frac{Q^2}{T^2}$$

Mais Q qui est le débit de gaz en volume vaut :

$$Q = S v$$

donc,

$$h = \frac{S^2 v^2}{T^2}$$

On admet que le mélange de vapeur d'échappement et de gaz se fait sans changement de masse spécifique, c'est-à-dire sans changement de pression ni de température. Cette hypothèse résulte du fait que le temps de passage à travers la cheminée est très court et n'est pas suffisant pour permettre à des échanges

calorifiques importants de se faire et du fait que la dépression dans la boîte à fumée est faible donc que la pression varie peu au cours de la traversée de la cheminée. Dans ce cas le volume du mélange vapeur et gaz est égal à la somme des volumes des éléments constituants. On écrit :

$$w = sV + Sv$$

Dans l'équation (1) on remplace W par sa valeur tirée de cette égalité, on remplace également h de sa valeur tirée de l'égalité qui définit le tempérément, ensuite on multiplie tous les termes par le facteur non nul $\frac{S}{s^2V^2}$ et on obtient ;

$$(2) \left[\gamma \left(1 - \frac{S}{s} \right) - \frac{\sigma \cdot S}{T^2} \right] \frac{S^2 v^2}{s^2 V^2} - \frac{S}{s} (\gamma + \delta) \frac{Sv}{sV} + \delta S \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s'} \right) = 0$$

Cette équation donne la valeur du rapport $\frac{Sv}{sV}$ en fonction des caractéristiques de construction de l'échappement (section des orifices, tempérément de la chaudière) et des masses spécifiques. Ce rapport est celui du débit des gaz aspirés dans la cheminée au débit de vapeur qui sort de l'échappement.

On voit donc que dans un échappement donné sur une chaudière donnée il y a proportionnalité entre le volume de gaz aspirés à travers le faisceau tubulaire et le volume de vapeur envoyée à l'échappement. Les densités restant à peu près constantes, on peut dire qu'il y a proportionnalité entre le poids des gaz aspirés et le poids de vapeur qui s'échappe.

Cette proportionnalité entre les volumes de gaz aspirés et de vapeur injectée entraîne une relation entre la dépression dans la boîte à fumée et la contre-pression à l'échappement.

En effet, on écrit (ρ étant une constante) :

$$\frac{Sv}{sV} = \rho$$

et comme : $Sv = T \sqrt{\frac{h}{s}}$
 on peut écrire : $\frac{T \sqrt{\frac{h}{s}}}{sV} = \rho$

ce qui montre que dans un échappement où (s) est donné la dépression dans la boîte à fumée est proportionnelle au carré du débit de vapeur d'échappement.

En outre, si on appelle p la contrepression à l'échappement, c'est-à-dire l'excès de la pression de la vapeur d'échappement sur la pression atmosphérique (ou sur la pression dans la boîte à fumée qui en diffère peu), on a suivant la loi de Bernoulli :

$$\frac{V^2}{2} = \frac{p}{\delta}$$

on admet que δ reste constant au cours de l'écoulement et, par conséquent, ρ peut s'écrire :

$$(3) \quad \rho = \frac{T \sqrt{\frac{h}{s}}}{s \sqrt{2 \frac{p}{\delta}}} = \frac{T}{s} \sqrt{\frac{h \delta}{2 p}}$$

ce qui montre que le rapport $\frac{h}{p}$ est constant si (s) l'est.

Donc cette théorie nous amène à dire que dans une machine donnée la dépression dans la boîte à fumée est proportionnelle à la contrepression.

La courbe expérimentale qui donne pour un échappement la valeur de la dépression obtenue dans la boîte à fumée en fonction de la contrepression dans la colonne d'échappement n'est pas une droite mais une courbe de faible courbure qui montre que la contre-pression à l'échappement croît plus vite que la dépression dans la boîte à fumée. Cela tient à tous les éléments qu'on a négligés pour établir cette théorie qui donne une idée approchée de ce qui se passe. Cette courbe s'appelle la courbe caractéristique de l'échappement.

On voit, en outre, par les égalités (2) et (3) que le tirage et la dépression dans la boîte à fumée ne dépendent pas du volume de la boîte à fumée. La quantité de gaz aspiré ne dépend que des sections de passage et la dépression ne dépend que de la contrepression dans la colonne d'échappement. Le volume de la boîte à fumée peut, toutefois, intervenir pour amortir les oscillations de la dépression. L'échappement, en effet, n'est pas un jet continu de vapeur, il se fait par pulsations successives; la valeur de la contrepression dans la colonne est variable et, par suite, la dépression oscille également autour d'une valeur moyenne. L'amplitude de cette oscillation est évidemment d'autant plus réduite que le volume de la boîte à fumée est plus grand. Mais la valeur moyenne de la dépression ne dépend pas du tout de la grandeur de ce volume.

En résumé, l'effet d'un échappement par injection dans la cheminée dépend uniquement des grandeurs des sections de passage du faisceau tubulaire, de la colonne d'échappement et de la cheminée.

Cette conclusion suppose que le tempérament de la chaudière est constant, que les densités des gaz et de la vapeur ne varient pas au cours de leur trajet dans la boîte à fumée et dans la cheminée et surtout que le mélange de la vapeur et des gaz se fait parfaitement à l'entrée dans la cheminée, que les pertes par frottement, viscosité et remous sont négligeables.

Il n'en est pas toujours ainsi dans la réalité et l'échappement parfait n'est qu'un cas limite.

3^o Rôle et qualités exigées d'un bon échappement

a) Equilibre entre la production de vapeur et l'aspiration des gaz brûlés.

On demande au système de tirage forcé de provoquer l'activité de combustion nécessaire pour que la production de vapeur suffise à la demande du moteur. Comme toute la vapeur produite passe dans le système d'injection, le poids de gaz aspirés et, par suite, l'activité de la combustion est fonction du poids de vapeur produite. Il faut donc que le dispositif soit réglé de telle sorte que le débit de vapeur par la tuyère crée le vide nécessaire pour que la combustion qui en résulte produise la vaporisation de la même quantité de vapeur (aux pertes par fuites et condensations près). On doit tenir compte du rendement de la chaudière pour connaître l'activité de combustion nécessaire à la vaporisation et comparer ce rendement à la relation entre le poids de gaz aspirés et le poids de vapeur qui s'échappe. Il faut que le poids de gaz aspirés par un poids donné de vapeur passant dans la cheminée soit au moins égal à celui qui résulte de la combustion du charbon nécessaire à la production du poids de vapeur donné, et ce, à toutes les allures de marche.

b) Contrepression aussi faible que possible.

Le système d'injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée oppose une certaine résistance à la sortie de cette vapeur. Il crée une contrepression sur la face du piston qui est à l'échappement et, par conséquent, il absorbe une partie de la puissance apportée par la vapeur aux cylindres. Le tirage nécessite de vaincre des résistances; il faut fournir un travail pour cela; c'est ce travail qui est demandé à l'échappement. On a intérêt à obtenir le résultat cherché en dépensant le minimum de travail, c'est-à-dire en essayant d'avoir le meilleur rendement possible de l'appareil. Il faut donc que la contrepression soit la plus faible possible pour un vide déterminé dans la boîte à fumée.

c) Répartition et régularité du tirage.

Il ne suffit pas que l'échappement crée un bon vide pour une faible contrepression; il faut encore que ce vide soit réparti dans la boîte à fumée de telle sorte que le tirage à travers les différents tubes à fumée crée un courant d'air uniformément réparti à travers la couche de charbon. Il faut cette condition pour obtenir que toute la surface de la grille soit convenablement employée pour la combustion. Si, en effet, le tirage est mal réparti, il y aura des parties de la grille où la combustion sera faible, tandis qu'en d'autres parties, il y aura excès d'air et arrachement du feu. La combustion totale sur toute la grille sera inférieure à ce qu'elle doit être quand toute la surface est convenablement utilisée. Le tirage qui est nécessairement pulsé ne doit pas présenter de valeur instantanée capable de provoquer l'arrachement du feu.

La dépression qui règne dans la boîte à fumée est mesurable par un vacuomètre, sorte de manomètre à membrane élastique ou plus simplement à l'aide d'un tube de verre recourbé en U contenant de l'eau colorée par exemple; l'une des branches reçoit la pression extérieure, l'autre est reliée à la boîte à fumée et subit sa pression intérieure. La différence des pressions reçues par les 2 branches de tube se traduit par une différence de hauteur des niveaux du liquide. La planchette qui supporte le tube est graduée en centimètres, la pratique montre que des dénivellations de 18 à 22 cm. d'eau correspondent à un très fort tirage. Autrement dit, une dépression de l'ordre de 20 grammes est un maximum; ce faible chiffre explique que la plus faible rentrée d'air ou fuite de vapeur dans la boîte à fumée nuise beaucoup au tirage.

4^o Etablissement d'un échappement

a) Données expérimentales.

De nombreuses recherches expérimentales ont été faites pour connaître les règles à observer dans la construction des échappements, les dimensions des éléments et leurs positions relatives,

La théorie de Zeuner permet de déterminer les valeurs des sections de passage des gaz et de la vapeur; mais, elle suppose que le mélange de vapeur et de gaz brûlés se fait parfaitement. Il n'en est pas ainsi dans la réalité et les conditions de la théorie ne sont pas toujours bien réalisées.

Les recherches expérimentales ont donc eu surtout pour but la détermination des dispositions à prendre pour réaliser le meilleur mélange possible.

Les expériences de Zeuner et de Nozo et Geoffroy faites en 1863, de Von Borries faites en 1894 et de Légein en 1920 ont porté sur les échappements simples à une tuyère. Elles ont eu pour but la détermination de la longueur et du diamètre de la cheminée et de la hauteur séparant la tuyère d'échappement de la cheminée. D'autres expériences faites par Prussmann ont porté sur la forme à donner à la cheminée; on est resté à la cheminée légèrement conique de forme simple.

Les formules empiriques données à la suite de ces essais sont très nombreuses, sans qu'aucune ne soit satisfaisante. On citera la formule de Von Borries établie pour un échappement à une seule tuyère et un seul jet de vapeur et pour un taux de combustion horaire de 400 kgs/m². Elle donne le diamètre (d) de la tuyère en fonction de la surface de grille (G) et de la section totale (S) de passage à travers les tubes.

$$d = 0,156 \sqrt{\frac{SG}{S + 0,3G}}$$

b) Réglage par les courbes caractéristiques.

Pour connaître la capacité d'un échappement on relève sa courbe caractéristique qui donne la dépression obtenue dans la boîte à fumée en fonction de la contrepression à l'échappement.

Pour savoir si l'échappement examiné convient à une chaudière donnée, il faut comparer sa courbe caractéristique à la courbe de rendement de la chaudière, c'est-à-dire à celle qui représente la quantité de vapeur produite en fonction de la quantité de combustible brûlé.

En effet, d'une part, la courbe caractéristique du rendement de la chaudière peut être facilement remplacée par une courbe représentant la quantité de vapeur produite en fonction du vide dans la boîte à fumée. Ce vide est, par la relation qui définit le tempérament de la chaudière proportionnel au carré du débit des gaz brûlés aspirés et celui-ci est directement lié au poids de combustible brûlé.

D'autre part, dans la courbe caractéristique de l'échappement la contrepression est proportionnelle au carré du débit de vapeur qui crée cette contrepression. Nous avons vu, en effet, quelle relation il y a entre cette contrepression et la vitesse de la vapeur ($v = \sqrt{2 \frac{p}{\delta}}$); en multipliant cette vitesse par la section s de la tuyère, on a le débit.

On peut donc tracer avec les mêmes coordonnées la courbe de rendement de la chaudière (vapeur produite par seconde (w) en fonction de la dépression (h) de la boîte à fumée) et la courbe caractéristique de l'échappement employé (débit de vapeur nécessaire pour produire un vide déterminé dans la boîte à fumée).

La comparaison de ces deux courbes permet de voir si l'échappement est bien adapté à la chaudière, c'est-à-dire s'il permet d'obtenir toute sa puissance. Les deux courbes tracées passent toutes deux par l'origine des coordonnées. La courbe du rendement de la chaudière a, en général, sa concavité tournée vers l'axe des dépressions, c'est-à-dire que la dépression croît plus vite que la quantité de vapeur produite; tandis que pour la courbe caractéristique de l'échappement, c'est l'inverse, le débit de vapeur nécessaire croît plus vite que la dépression produite dans la boîte à fumée. On obtient donc des courbes dont l'allure est représentée sur la *figure 151*. Ces deux courbes se rencontrent en un deuxième point autre que l'origine des coordonnées. Selon l'échappement ce point de rencontre peut être plus ou moins rapproché du maximum de la courbe de rendement de la chaudière. Ce point de rencontre caractérise un fonctionnement pour lequel il y a équilibre entre la production de vapeur w et la quantité de vapeur nécessaire à l'échappement pour provoquer la combustion correspondante. Pour produire une quantité de vapeur supérieure à celle-ci on voit d'après la courbe de rendement de la chaudière qu'il faut une dépression qui, d'après la courbe caractéristique de l'échappement, ne peut être obtenue que par un débit de vapeur supérieur à la quantité produite. On ne peut donc pas, avec la chaudière munie de l'échappement examiné, obtenir une production supérieure à celle définie par le point de rencontre des deux courbes. Il serait possible d'obtenir l'activité de combustion nécessaire en modifiant une des cotes de l'échappement, par exemple par serrage, de façon à obtenir un échappement dont la courbe caractéristique soit différente et rencontre la courbe de rendement de la chaudière en un point plus rapproché de son maximum. Pour produire une quantité de vapeur inférieure à celle qui correspond au point de rencontre des deux courbes, il suffit, sans toucher à l'échappement, de diminuer le chargement sur la grille. On voit alors que la production de vapeur est excédentaire, il en est produit plus qu'il n'en faut à l'échappement pour produire le vide nécessaire à la combustion correspondante. Comme toute la vapeur produite W₁ passe par l'échappement, le vide dans la boîte à fumée sera celui h₁ qui est indiqué par le point de la courbe caractéristique d'ordonnée W₁ (*fig. 151*). On voit qu'il est supérieur à celui h₂ qui est nécessaire au tirage et le volume de gaz aspirés est plus grand que celui qui est produit par la combustion complète correspondant à la production W₁ de vapeur. Cette combustion se fera donc avec un excès d'air.

En résumé, on peut obtenir par réglage du feu la production que l'on veut jusqu'à la limite indiquée par le point de rencontre des deux courbes. C'est ce point qui indique le maximum que l'on peut obtenir de l'ensemble chaudière et échappement examiné. Il faut que l'échappement soit réglé de telle façon qu'il permette d'obtenir toute la puissance de la chaudière lorsqu'on en a besoin. Il faut donc que le point de rencontre des deux courbes soit situé le plus près possible du maximum de la courbe de rendement de la chaudière.

On connaît ainsi, pour une chaudière donnée, un point de la courbe caractéristique de l'échappement qu'il faut lui donner. On peut donc, en première approximation, obtenir la section s de la tuyère en divisant le débit par la vitesse de la vapeur qui est déterminée par la formule :

$$v = \sqrt{2 \frac{p}{\delta}}$$

La mise au point finale s'obtient en jouant sur cette section s .

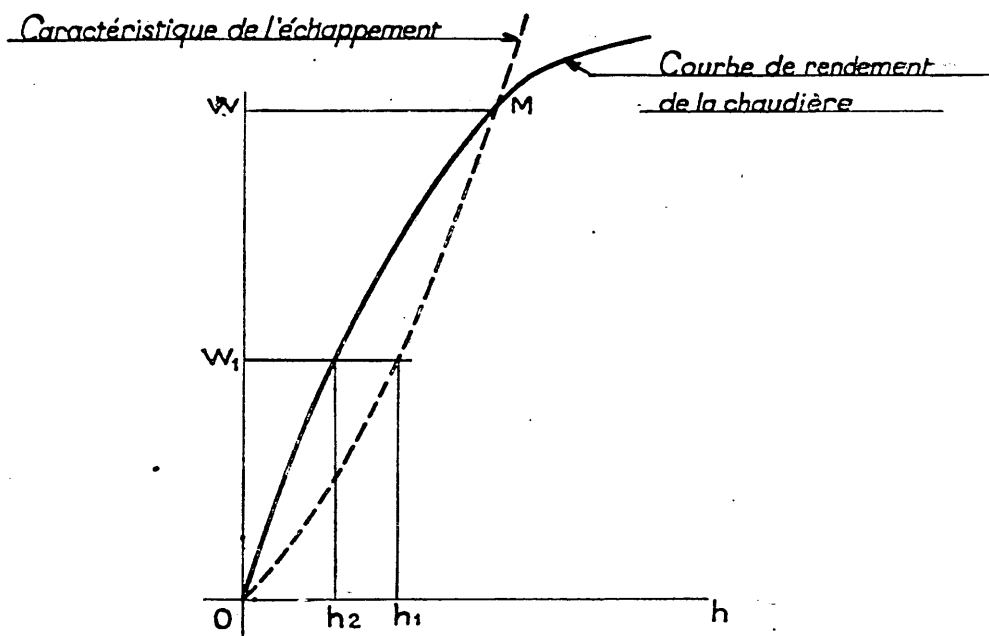


FIG. 151

c) Particularités de certains échappements.

Nous venons de voir que dans le choix et la détermination d'un échappement, il faut que la courbe caractéristique passe par un point bien déterminé situé sur la courbe de rendement de la chaudière; il faut que la relation établie par l'échappement entre la dépression dans la boîte à fumée et le débit de vapeur nécessaire pour établir ce vide soit vérifiée pour des valeurs données à l'avance par la nature même de la chaudière pour laquelle on étudie l'échappement. Mais il ne suffit pas que cela soit réalisé; il faut encore que la forme de la courbe caractéristique convienne.

En effet, avec certaines formes de courbes caractéristiques d'échappement on peut avoir des anomalies de fonctionnement de la chaudière. Celle-ci ne peut alors être utilisée que pour obtenir des productions comprises entre deux limites, l'une inférieure, l'autre supérieure. La production est non seulement limitée, mais la chaudière vaporise mal aux faibles allures. Cela peut se produire si les deux courbes caractéristiques ont une inclinaison voisine à l'origine et si l'une présente un point d'inflexion (M_1 par exemple). Cela peut tenir au fait que le tempérament de la chaudière n'est pas rigoureusement constant et qu'il diminue un peu lorsque l'allure de combustion diminue. La courbure à l'origine de la courbe de rendement de la chaudière est donc dirigée vers l'axe W puis change au point d'inflexion pour être dirigée vers l'axe h . Si la courbure de la courbe caractéristique de l'échappement est à l'origine inférieure à celle de la courbe de rendement de la chaudière, il y aura deux points de rencontre M_1 et M_2 des deux courbes (fig. 152).

Le point M_2 indique la limite de la puissance de la chaudière comme nous l'avons vu. Le point M_1 indique une limite inférieure des possibilités de vaporisation car pour obtenir une quantité de vapeur inférieure à celle W_1 correspondant au point M_1 , il faut fournir à l'échappement une quantité de vapeur supérieure à celle produite.

d) Discontinuité de l'échappement.

Il faut également atténuer le plus possible l'effet de l'écoulement discontinu de la vapeur d'échappement. Cette discontinuité est surtout très nette avec les machines à deux coups d'échappement par tour de roue ou avec celles munies de soupapes d'échappement à ouverture rapide. Elle crée des variations assez grandes de la dépression dans la boîte à fumée et, par suite, un tirage irrégulier au cours duquel il y a tantôt arrachement d'escarbilles; tantôt arrêt de tirage. Il y a donc, dans ce cas, intérêt pour atténuer l'amplitude des oscillations de la dépression autour de sa valeur moyenne à mettre une boîte à fumée du plus grand volume possible et à diminuer la rapidité du début d'évacuation du moteur.

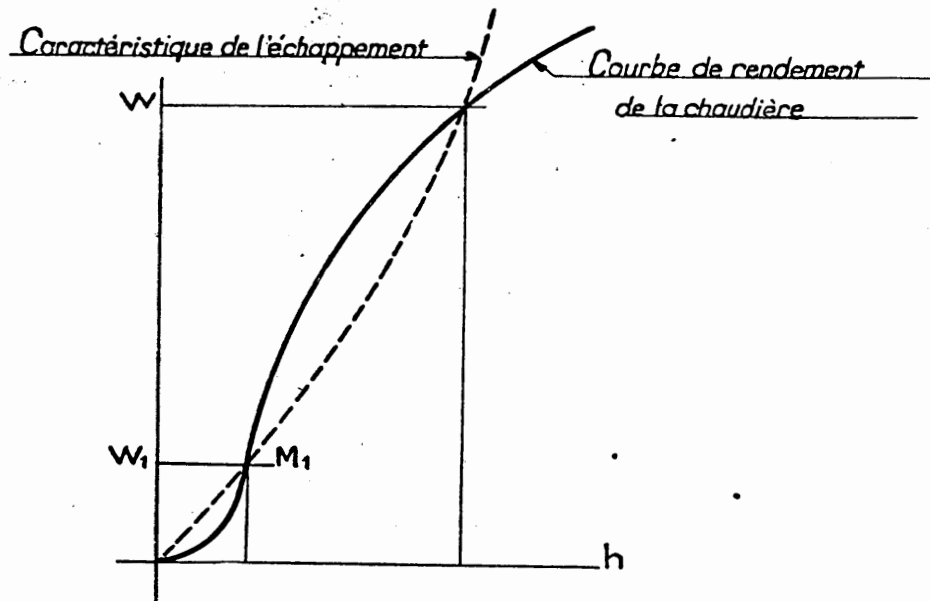


FIG. 152

e) Utilité de l'échappement variable.

Nous avons vu, dans l'examen de la théorie de l'échappement, que le volume d'air aspiré est proportionnel au volume de vapeur sortant de la tuyère d'échappement. Nous avons vu également en rapprochant la courbe caractéristique de l'échappement de la courbe de rendement de la chaudière sur laquelle il est monté qu'il suffit de faire le réglage pour la production maxima dont la chaudière est capable. Pour les productions inférieures, la combustion se ferait avec un excès d'air et c'est par la conduite du feu seulement que la production serait réglée.

Mais ceci suppose que les données sur lesquelles on raisonne sont constantes. Il n'en est pas ainsi dans la réalité. Le charbon n'est pas toujours le même et on doit en brûler plus ou moins selon son pouvoir calorifique, le volume d'air nécessaire à la combustion du kg. varie de l'un à l'autre. Il faut, par conséquent, que l'échappement donne, pour un poids de vapeur donné, un tirage variable, il faut que ses caractéristiques puissent être adaptées à la situation. En outre, la possibilité de changer la caractéristique de l'échappement est un moyen précieux mis à la disposition du personnel de conduite pour rattraper une baisse de pression et de niveau de l'eau qui a pu se produire accidentellement. Pour cela, en effet, il faut que pendant un certain temps la production soit supérieure à la consommation. L'échappement variable permet de faire donner un excès de puissance pendant quelque temps en puisant un peu dans la réserve de la chaudière; l'échappement fixe ne le permet pas puisqu'après on ne peut pas reconstituer cette réserve.

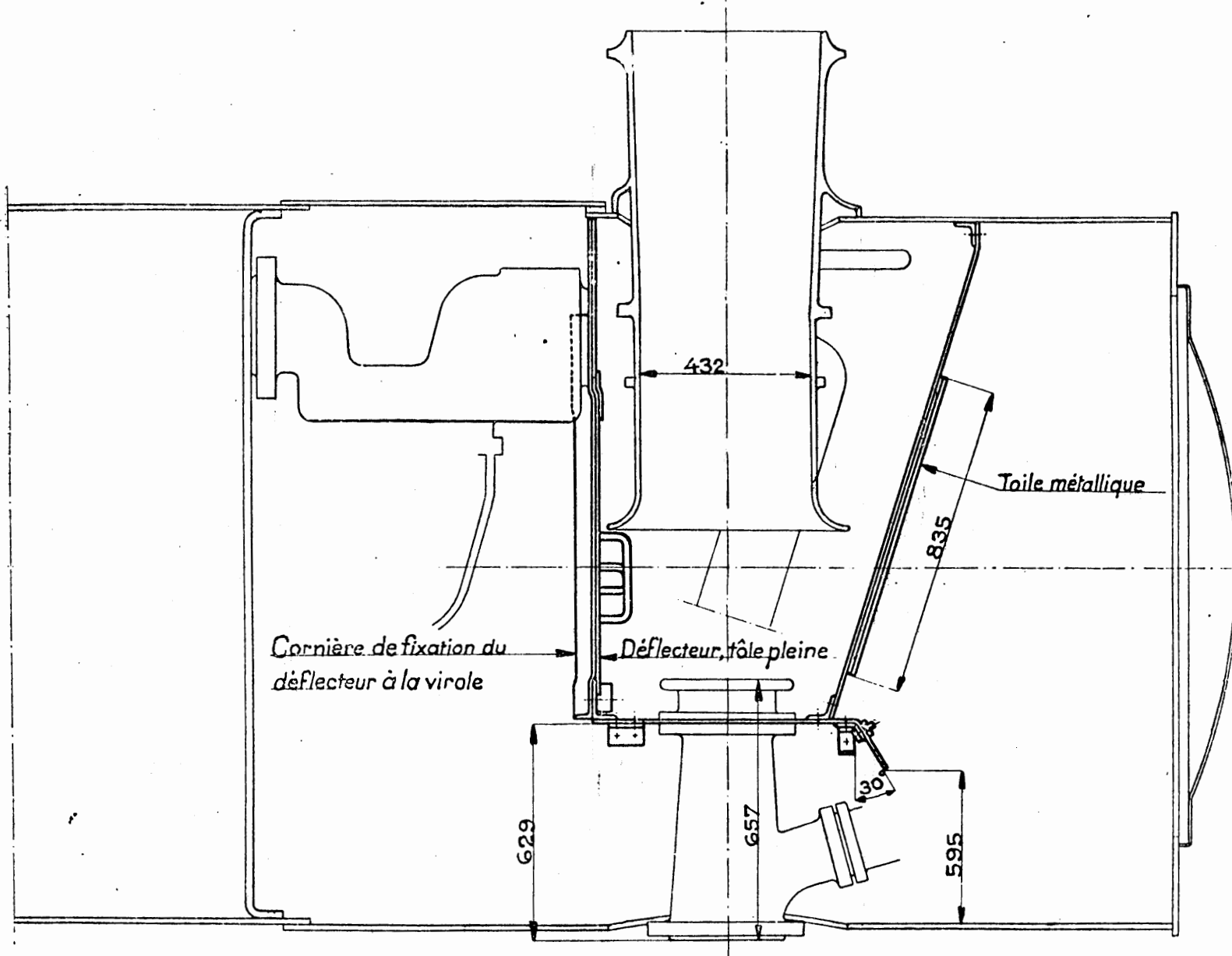


FIG. 152 A

f) Principes des dispositifs employés.

Les premiers échappements employés consistaient en une simple tuyère à orifice fixe ou variable par laquelle la vapeur était injectée dans la cheminée. Ils donnaient un jet conique. Puis, plusieurs dispositifs ont été employés pour répartir convenablement le tirage entre les tubes du faisceau afin que la combustion se fasse uniformément sur la grille et pour améliorer le mélange de la vapeur et des gaz brûlés afin d'accroître le tirage sans augmenter la contrepression dans la tuyère.

1° La répartition du tirage entre les tubes est obtenue soit par l'emploi de déflecteurs, soit par le mélange étagé.

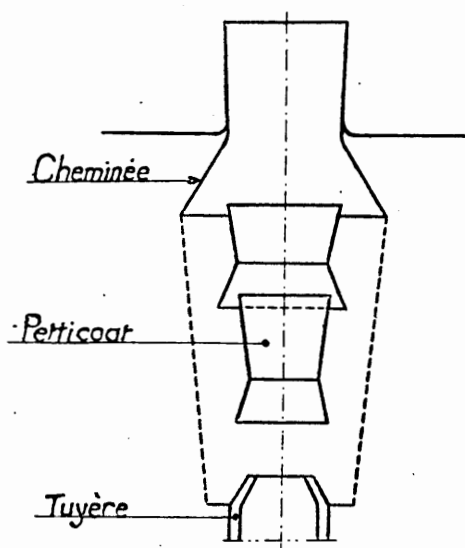


FIG. 153

Le déflecteur est un simple écran en tôle interposé entre la plaque tubulaire et la tuyère d'échappement de façon à dévier le courant gazeux venu des tubes qui, en l'absence d'écran, seraient soumis directement à l'aspiration. Ce système employé en Amérique à l'origine a l'inconvénient de créer une résistance supplémentaire au passage des gaz et il faut, par conséquent, demander un supplément de puissance à l'échappement pour obtenir la dépression nécessaire dans la boîte à fumée.

Il a toutefois un autre but, celui de supprimer la vidange des escarbilles, celles-ci se trouvant automatiquement entraînées dans la cheminée après s'être brisées en passant au travers d'une grille à mailles serrées.

La figure 152 A représente ce dispositif de « self cleaning » ou désescarilleur appliqué aux 141 R. Les rapports adoptés entre les sections de passage des gaz aux différents points de leur circuit et la section minimum à travers le faisceau tubulaire sont dérivés de normes « standard ». Ce dispositif concourt à la régularisation du tirage pulsatif et à la fumivorté.

L'étagement du mélange répartit la dépression dans la boîte à fumée par la création de plusieurs points d'aspiration et est un excellent procédé qui ne crée pas de résistance supplémentaire au passage des gaz. On obtient ce résultat par l'emploi de petticoats (machines d'origine américaine) représentés sur la figure 153. Ces petticoats sont des ajutages intermédiaires dans lesquels la vapeur pénètre à sa sortie de la tuyère d'échappement. Il y en a parfois plusieurs en série que la vapeur traverse successivement. L'aspiration se fait à chaque entrée de petticoat et à l'entrée dans la cheminée. Avec deux petticoats on a ainsi trois points d'aspiration dont on peut déterminer la position relative par rapport au faisceau tubulaire par le réglage en hauteur.

2° L'amélioration du mélange de vapeur et des gaz a été obtenue sur les échappements modernes par la division du jet de vapeur.

On peut obtenir ce résultat par l'emploi de barrettes mises en travers de la sortie de la tuyère. L'échappement à trèfle divise le jet en trois. Actuellement, on emploie des ajutages à jets multiples dans lesquels pénètre la vapeur déjà divisée par des barrettes à la sortie de la colonne d'échappement, elle sort en plusieurs jets séparés.

Comme l'ont montré les expériences de Von Borries sur l'emploi des barrettes, il faut avec le jet divisé employer des cheminées de plus grandes sections qu'avec le jet simple ou bien diminuer la hauteur qui sépare la cheminée du plan de sortie de la tuyère. Le jet divisé est, en effet, plus large que le jet unique et, si la cheminée n'est pas agrandie ou si la

hauteur la séparant de la tuyère n'est pas diminuée, le jet conique n'y pénètre pas tout entier et le vide se fait mal (1).

5° Rendement de l'échappement

a) Puissance absorbée par l'échappement.

On peut se rendre compte facilement de l'ordre de grandeur de la puissance qu'absorbe l'échappement d'après la contrepression qui règne dans la colonne d'échappement où la vapeur arrive à l'état de vapeur saturée.

En effet, 1 kg. de vapeur à 16 hectopièzes et surchauffée à 350° contient 750 calories; lorsque ce kg. s'échappe saturé à 1,2 hpz, il lui reste 640 calories; s'il s'échappait à la pression atmosphérique, il lui resterait 633 calories. On peut donc dire que c'est la puissance correspondant à 7 calories par kg. de vapeur qui est absorbée par l'échappement. Donc l'échappement absorbe $\frac{7}{750-640} = \frac{7}{110} = 0,064$ soit 6,4 % de la puissance indiquée de la machine, soit environ 150 chevaux pour les machines puissantes.

b) Rendement.

Le rendement énergétique d'un échappement se mesure par le rapport de l'énergie cinétique communiquée aux gaz absorbés à l'énergie cinétique de la vapeur d'échappement qui les absorbe. C'est donc le rapport des deux quantités $\frac{\gamma S v^2}{2}$ (énergie cinétique des gaz qui traversent le faisceau tubulaire en une seconde) et $\frac{\delta S V^2}{2}$ (énergie cinétique de la vapeur qui sort de la tuyère d'échappement en une seconde). Donc :

$$n = \frac{\gamma S v^2}{\delta S V^2}$$

Pour obtenir le meilleur rendement possible d'un échappement donné il importe que le montage soit correct et précis. Nous avons vu que c'est le point d'intersection de la courbe caractéristique de l'échappement avec la courbe de rendement de la chaudière qui indique la puissance maxima de vaporisation que l'on peut obtenir; ces deux courbes sont toutes deux de faible courbure sur une portion assez étendue de sorte qu'un déplacement très petit de la courbe caractéristique fait déplacer beaucoup le point de rencontre avec la courbe de rendement de la chaudière (*fig. 151*). Les sections et les dispositions des organes doivent donc être réglées avec précision pour obtenir l'efficacité maximum.

D'autre part, un mauvais centrage est nuisible au tirage et fait perdre à l'échappement une grande partie de son effet. Le tirage est alors très inégal et il y a arrachage du feu sur certaines portions de la grille alors qu'en d'autres points il n'y a presque pas de tirage. Il importe donc que les axes de la tuyère d'échappement des ajutages et de la cheminée soient bien tous confondus.

6° Description de divers types d'échappement

On retrouve sur les types d'échappement qui existent sur la Région de l'Ouest toute la gamme des dispositifs successivement adoptés au fur et à mesure des progrès réalisés pour améliorer le fonctionnement au double point de vue de l'efficacité et de la répartition du tirage.

a) Simple tuyère.

L'échappement le plus simple qui consiste en une tuyère verticale (*fig. 154*) d'où sort la vapeur pour se diriger dans la cheminée a à peu près disparu maintenant et n'existe plus que sur de très vieilles machines.

(1) C'est aussi pourquoi il vaut mieux régler l'échappement en employant une barrette qui diminue la section sans en modifier le pourtour, que d'agir sur le diamètre de l'ouverture.

b) Echappement à valves.

D'une façon générale, en France on a adopté l'échappement variable dès l'origine des chemins de fer alors que d'autres pays, tel que l'Angleterre, gardaient l'échappement fixe. Dans l'échappement variable on agit sur la section de sortie de la vapeur pour faire varier sa vitesse. C'est ainsi que l'on trouve l'échappement à valves (*fig. 155*) où les deux valves sont déplacées symétriquement par une commande par vis à deux pas égaux et opposés; une barrette placée en travers de la section de sortie divise le jet en deux et améliore le tirage comme nous l'avons signalé.

c) Echappement Nord et échappement à trèfle.

L'échappement Nord (*fig. 156*) qui date de 1900 et l'échappement à trèfle (du P.-L.-M.) (*fig. 157*) sont également variables.

Dans le premier une tuyère centrale mobile peut être déplacée verticalement par une tige actionnée par un doigt, lui-même commandé par un système de tringlerie et vis. On voit (*fig. 156*) que lorsque la tuyère est dans sa position la plus basse la section de passage de la vapeur est égale à toute la section de la tuyère fixe, la vapeur passe à la fois à l'intérieur et autour de la tuyère mobile. Lorsque la tuyère mobile est remontée, la section de passage restant autour d'elle est diminuée à cause de la forme de son profil. Lorsqu'elle est à sa position la plus haute, la vapeur ne peut plus passer qu'à l'intérieur, l'orifice annulaire est complètement obturé. Ce système ne fait pas que modifier la section de sortie de la vapeur d'échappement; il fait aussi varier sa hauteur ce qui influe aussi sur le tirage. C'est lorsqu'il est le plus serré que la différence de hauteur entre la section de sortie de la vapeur et la cheminée est la plus faible; la cheminée n'est alors pas bien remplie par le jet de vapeur et la diminution de l'efficacité qui en résulte atténue un peu l'effet du serrage (expé-

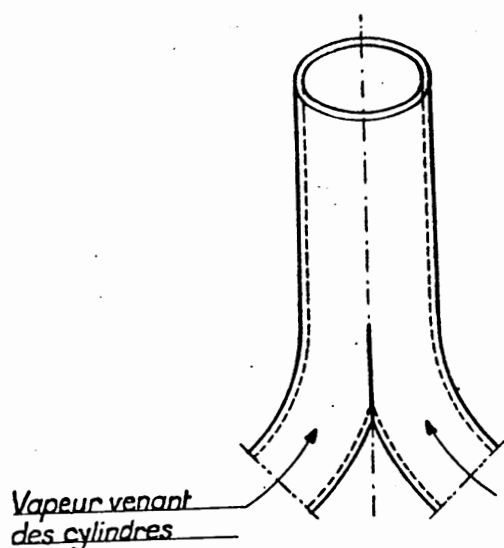


FIG. 154

riences de Legein en 1920). Au montage les ailettes de la tuyère mobile doivent être placées en prolongement des ailettes entretoisant le guide et la tête d'échappement. Les ailettes peuvent présenter une surface hélicoïdale qui communique un mouvement giratoire au jet de vapeur favorisant le brassage des gaz.

Dans l'échappement à trèfle l'orifice de sortie de la vapeur reste toujours à la même hauteur et, de plus, le diamètre extérieur du jet ne varie pas, de sorte que le serrage ou le desserrage ne modifie pas le remplissage de la cheminée. Le jet sortant de la tuyère fixe est divisé en trois par la présence d'une pièce mobile (*fig. 158*), dénommée trèfle, et qui peut être déplacée verticalement le long de l'axe de la tuyère fixe. On voit d'après la forme en coin des cloisons radiales du trèfle que la section de passage de la vapeur est plus grande lorsque le trèfle est dans sa position la plus haute complètement sorti de la tuyère que lorsqu'il est complètement rentré dans sa position la plus basse et, quelle que soit la position du trèfle dans la tuyère, c'est l'orifice fixe qui limite le contour extérieur du jet. Le serrage de l'échappement ne fait pas que réduire la section de sortie et accroître la vitesse de la vapeur, il sépare mieux les trois éléments du jet et favorise ainsi le mélange de vapeur et de gaz. Il agit donc doublement pour accroître le tirage.

d) Echappement américain à petticoats.

L'échappement américain (*fig. 153*) comporte une tuyère de section fixe surmontée de deux petticoats dont le rôle est de répartir le tirage à différentes hauteurs du faisceau tubu-

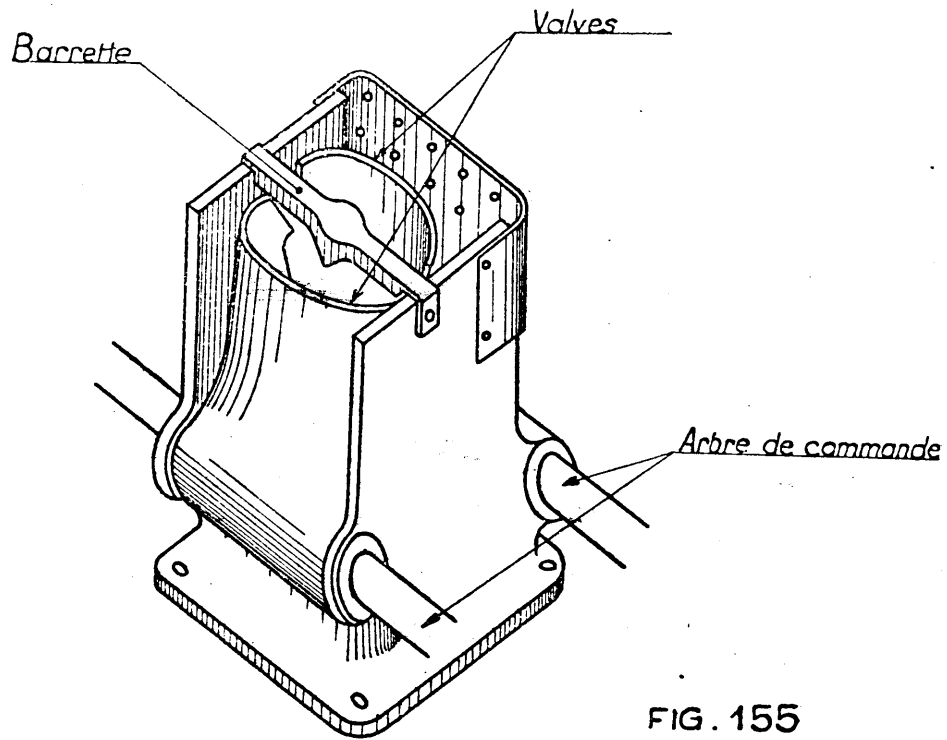


FIG. 155

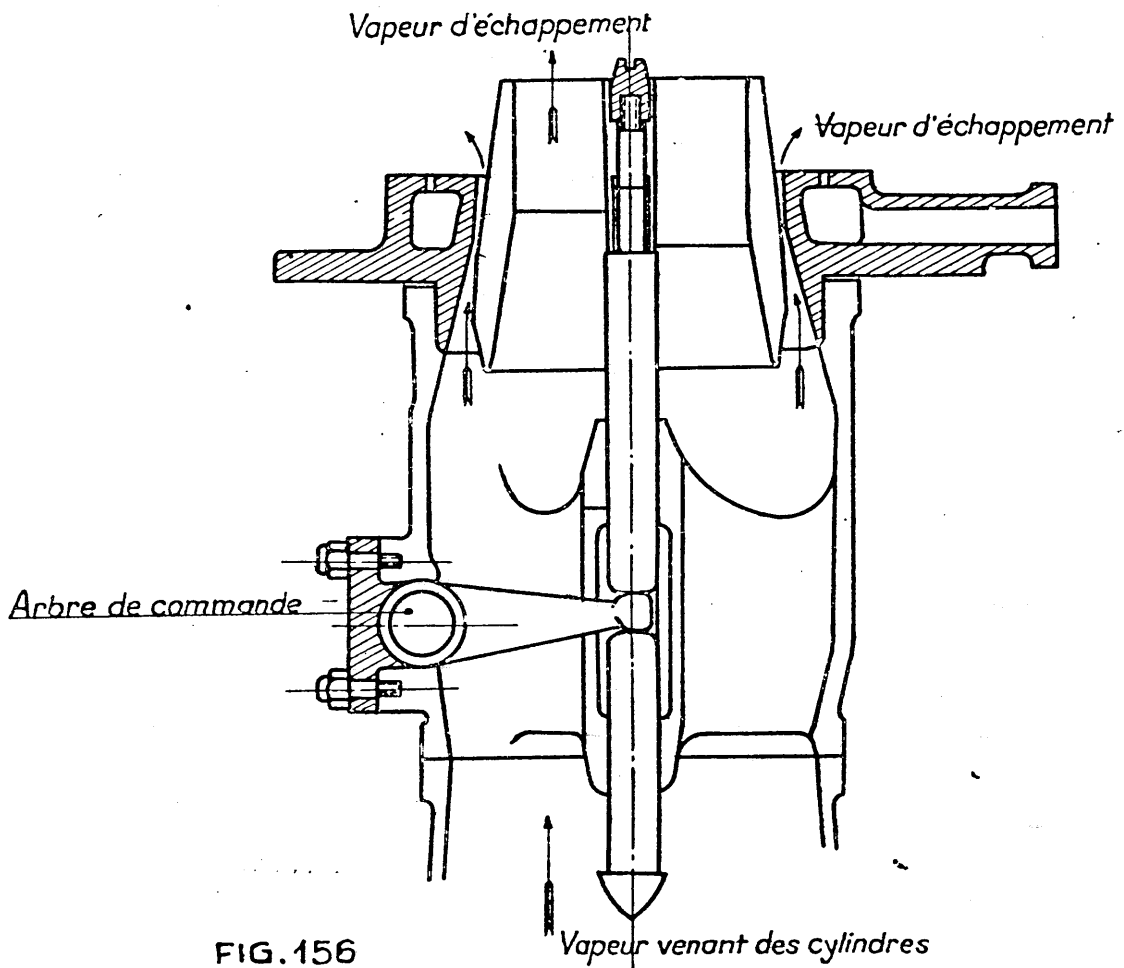


FIG. 156

laire de façon que la combustion se fasse uniformément sur la grille. Ils peuvent être réglés en hauteur au montage.

e) **Echappements Kylala et Kylchap.**

Sur les machines modernes ou récemment améliorées, on monte des échappements Kylchap qui dérivent de l'échappement Kylala. Ils sont fixes.

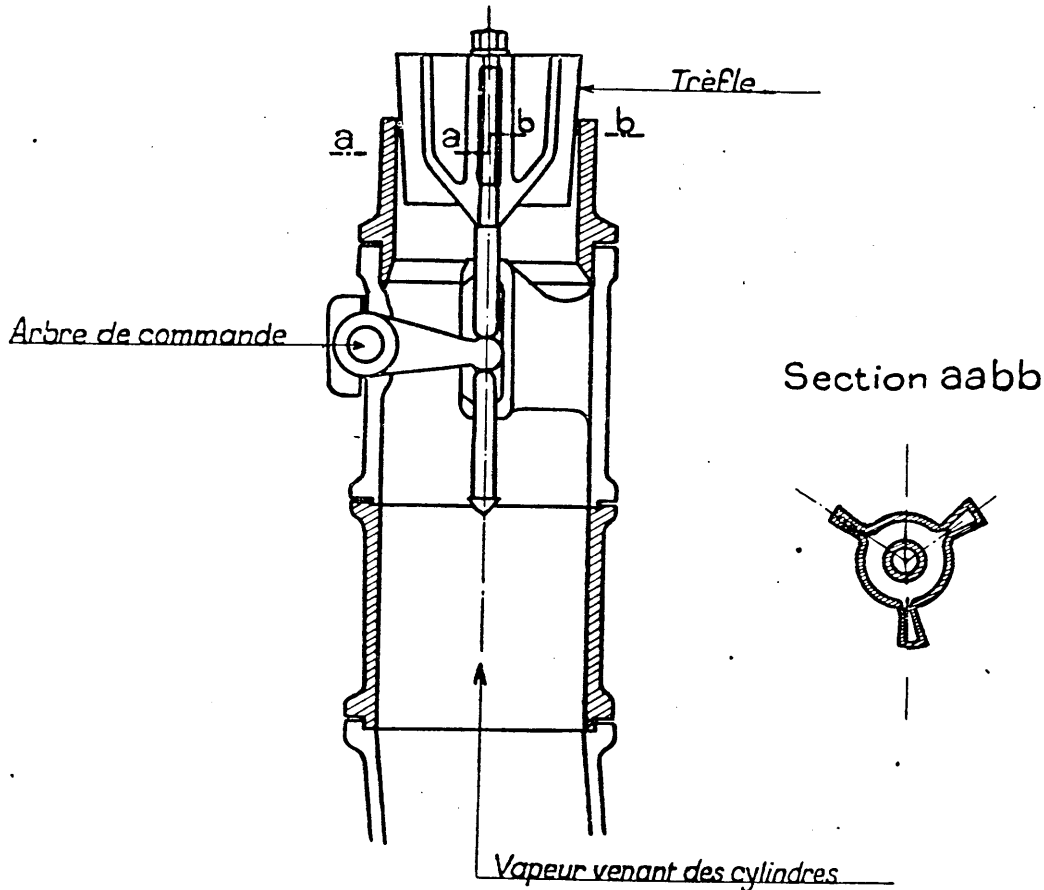


FIG. 157

L'échappement Kylala (du nom de l'inventeur) réalise une bonne division du jet par l'emploi d'un ajutage situé entre la cheminée et la tuyère d'échappement. L'ajutage Kylala (fig. 159) reçoit un jet unique de vapeur et le divise en quatre jets divergents par rapport à l'axe général de l'appareil de tirage. Il comprend pour cela quatre buses disposées de telle façon que les gaz de combustion puissent passer facilement entre elles, ce qui favorise le mélange gaz et vapeur. En même temps, cet ajutage réalise le tirage étagé comme les petti-coats américains.

Comme le jet est divergent, il faut que l'ajutage soit plus large à sa base que la tête de colonne et le jet qui en sert est encore plus élargi. Il faut alors une très grosse cheminée pour ramasser tout le jet; sinon il se crée des remous à sa base et on n'obtient pas tout l'effet de l'échappement.

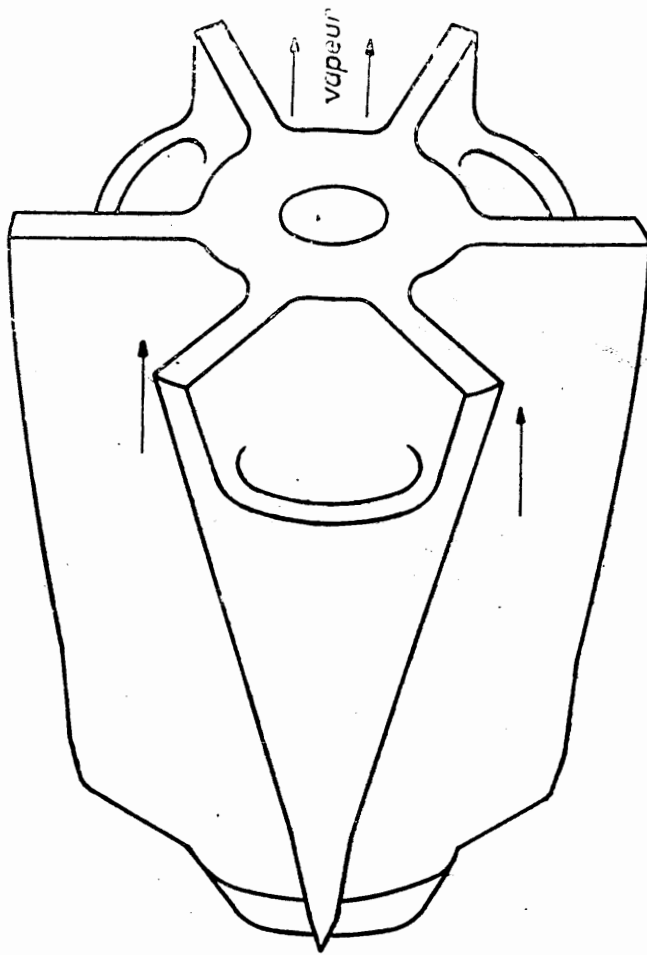


FIG. 158

tant de dédoubler le jet (fig. 162).

L'échappement Kylchap est un des meilleurs existant actuellement.

f) Echappement Lemaître.

L'échappement Lemaître n'a qu'un seul étage d'aspiration. Il comprend six tuyères : une tuyère centrale et cinq tuyères disposées autour de la première.

L'échappement Kylchap résulte de modifications apportées au Kylala par M. Chapelon, Ingénieur en Chef à la S.N.C.F. Sur la tuyère conique de la tête de colonne d'échappement on a placé à la partie supérieure des barrettes (ou couteaux) transversales divisant le jet en quatre éléments qui s'engagent dans les quatre buses de l'ajutage Kylala dont la base est évasée pour favoriser l'aspiration des gaz. Ces barrettes doivent donc être à l'aplomb des cloisons de l'ajutage Kylala. Dans le type IK/IC (fig. 160) on interpose un petticoat entre l'ajutage Kylala et la cheminée. Dans le type IK/T (fig. 161) la cheminée est terminée à sa partie inférieure par une sorte de trompe.

Dans les machines récentes pour réaliser de très fortes allures de vaporisation (20 à 25 tonnes/heure) on serait amené à utiliser des cheminées de très grosse section et de hauteur dépassant le gabarit car la hauteur de la cheminée est liée à sa section; on a installé deux échappements côte à côte dans l'axe de la chaudière. La colonne d'échappement est remplacée par une tubulure permet-

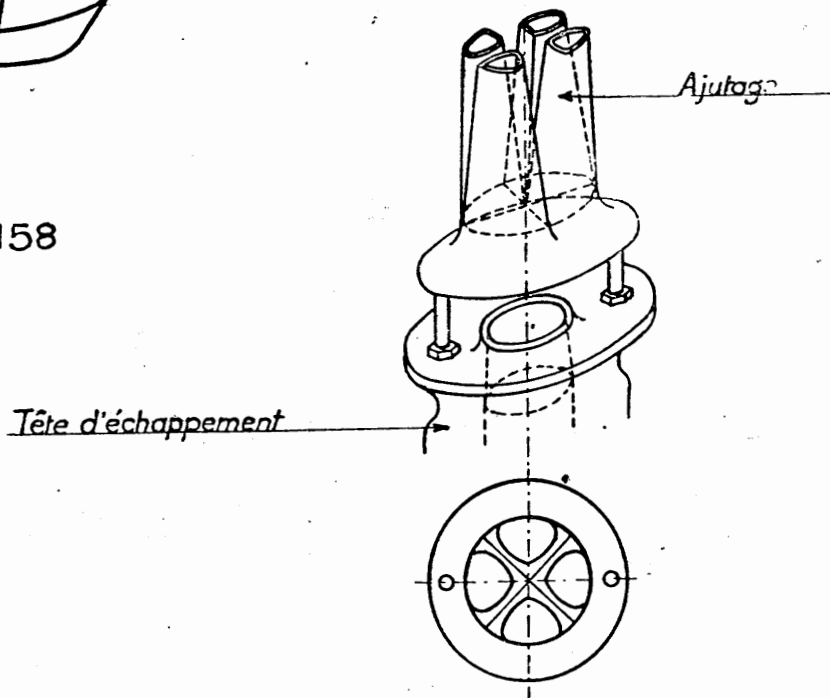


FIG. 159

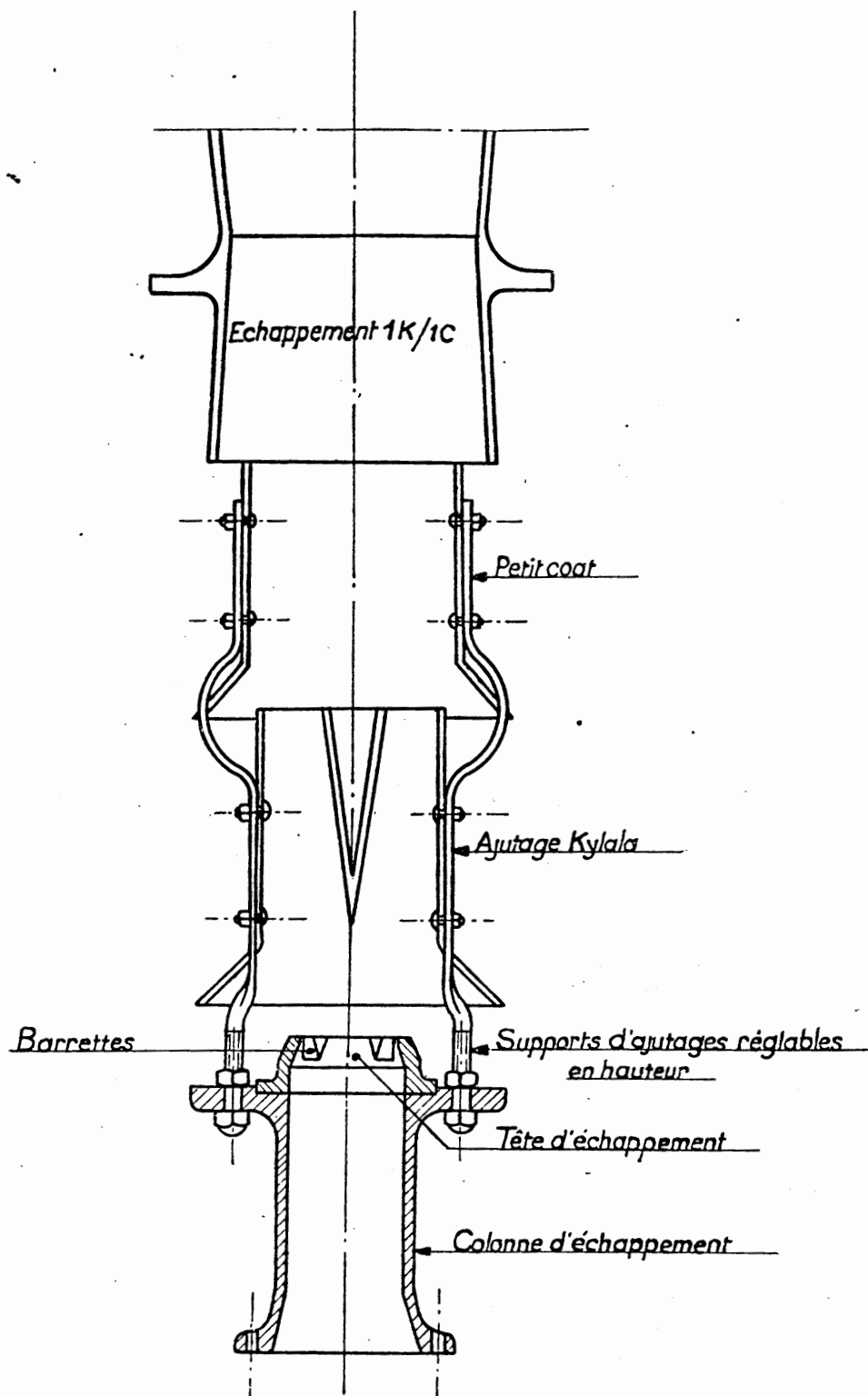


FIG. 160

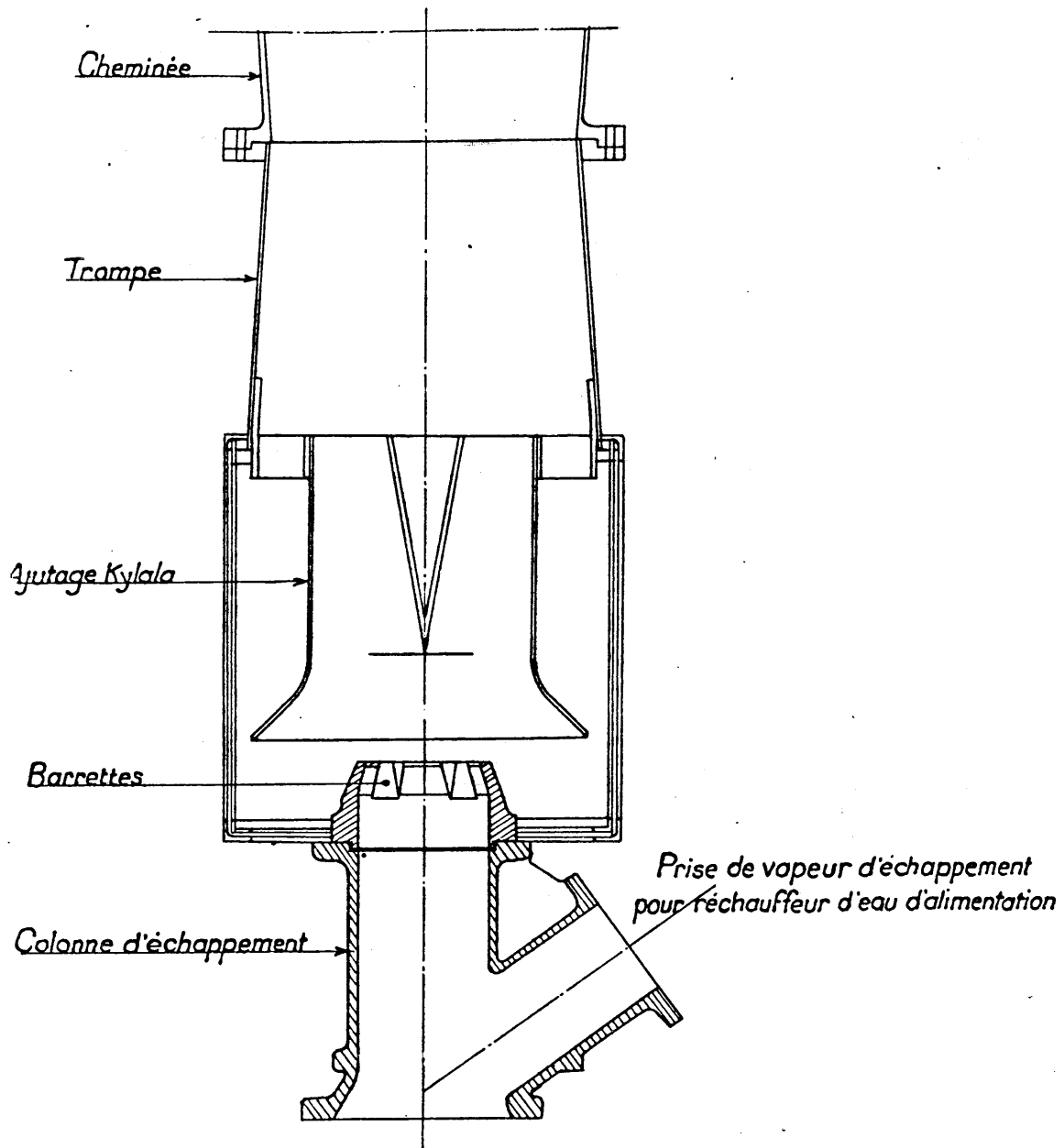


FIG. 161

La tuyère centrale peut être obturée plus ou moins par une poire que l'on peut déplacer verticalement (fig. 163). Cet échappement est donc variable. La vapeur sortant de ces tuyères sous forme de jet divisé pénètre ensuite dans une cheminée en forme de trompe. Son efficacité est voisine de celle du Kylchap.

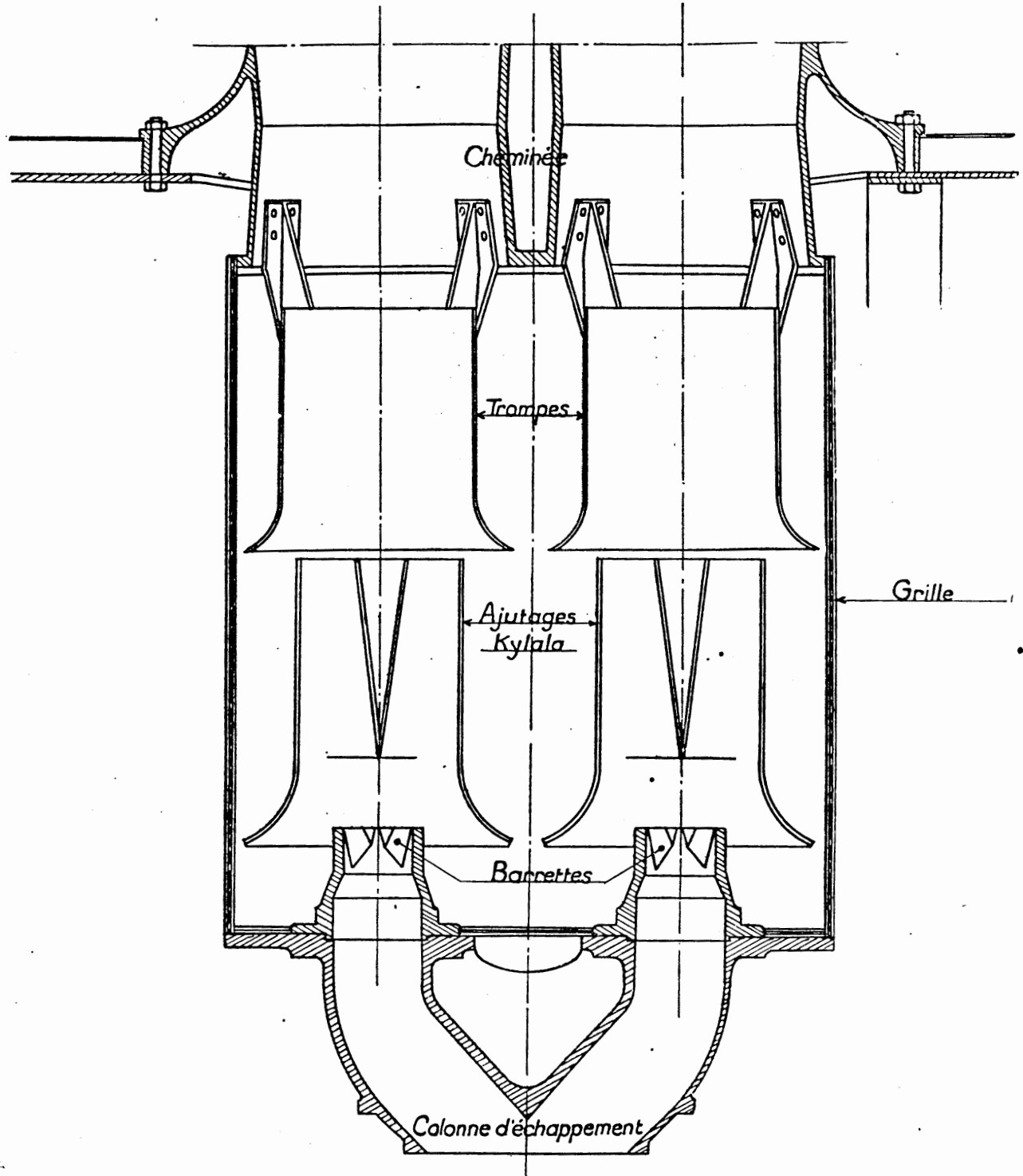


FIG. 162

7^o Essais comparatifs de divers types d'échappement

Nous indiquons sur les figures 165 à 169 les résultats enregistrés au cours d'essais sur les divers échappements employés sur la Région de l'Ouest.

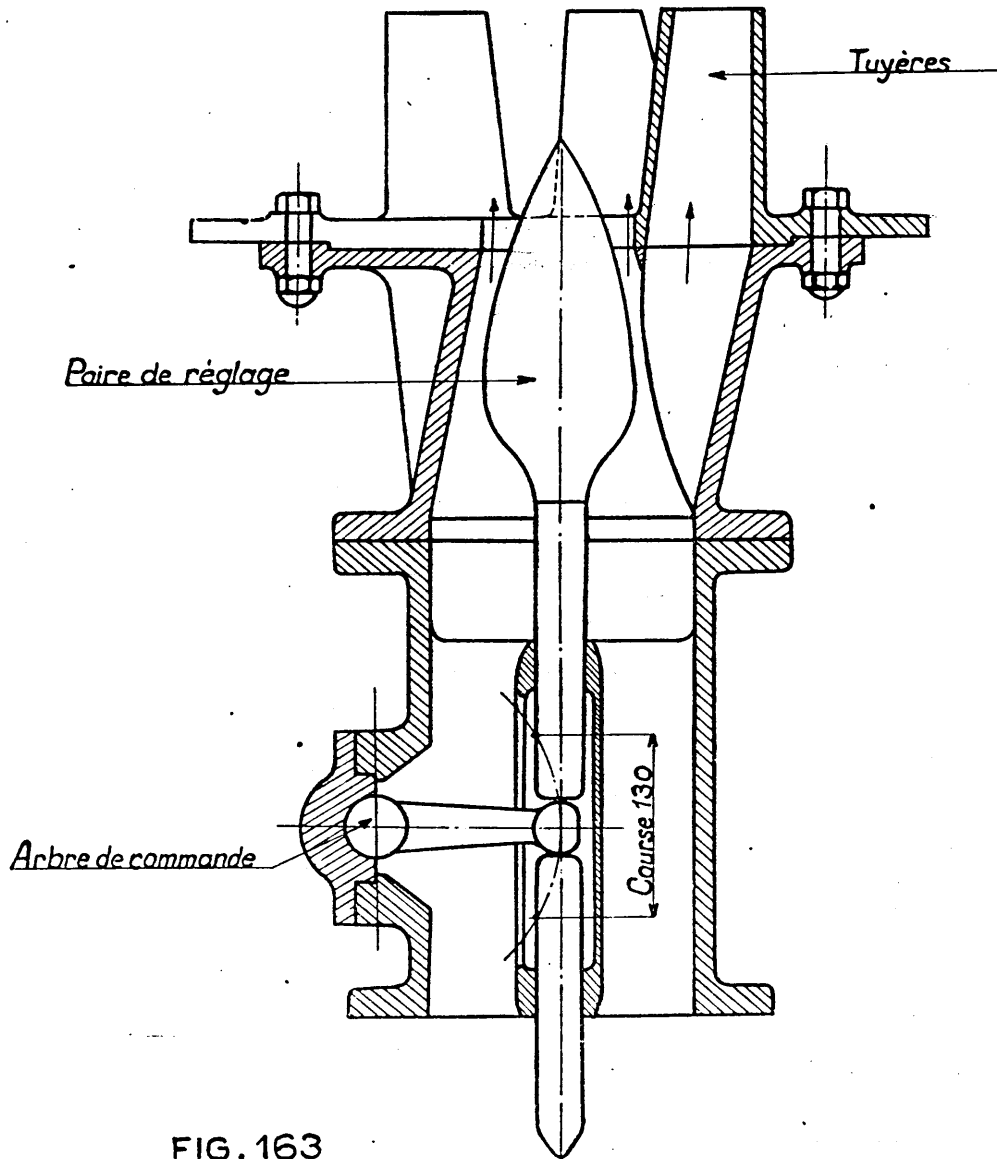


FIG. 163

Le diagramme de la figure 165 donne en fonction du taux de combustion la puissance absorbée par différents types d'échappements montés sur la 231-G-644. Cette puissance se détermine facilement par la contrepression qui règne à l'échappement. On voit que l'échappement Kylchap réalise un gros progrès par rapport à l'échappement à trèfle : pour réaliser un taux de combustion de 400 kg/m² de surface de grille/heure il faut 90 CV à l'échappement à trèfle et 26 CV seulement à l'échappement Kylchap double (2K/2C).

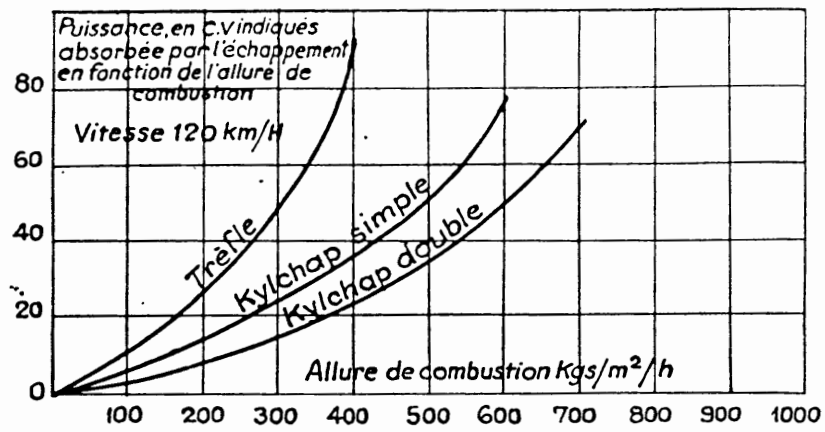


FIG. 165

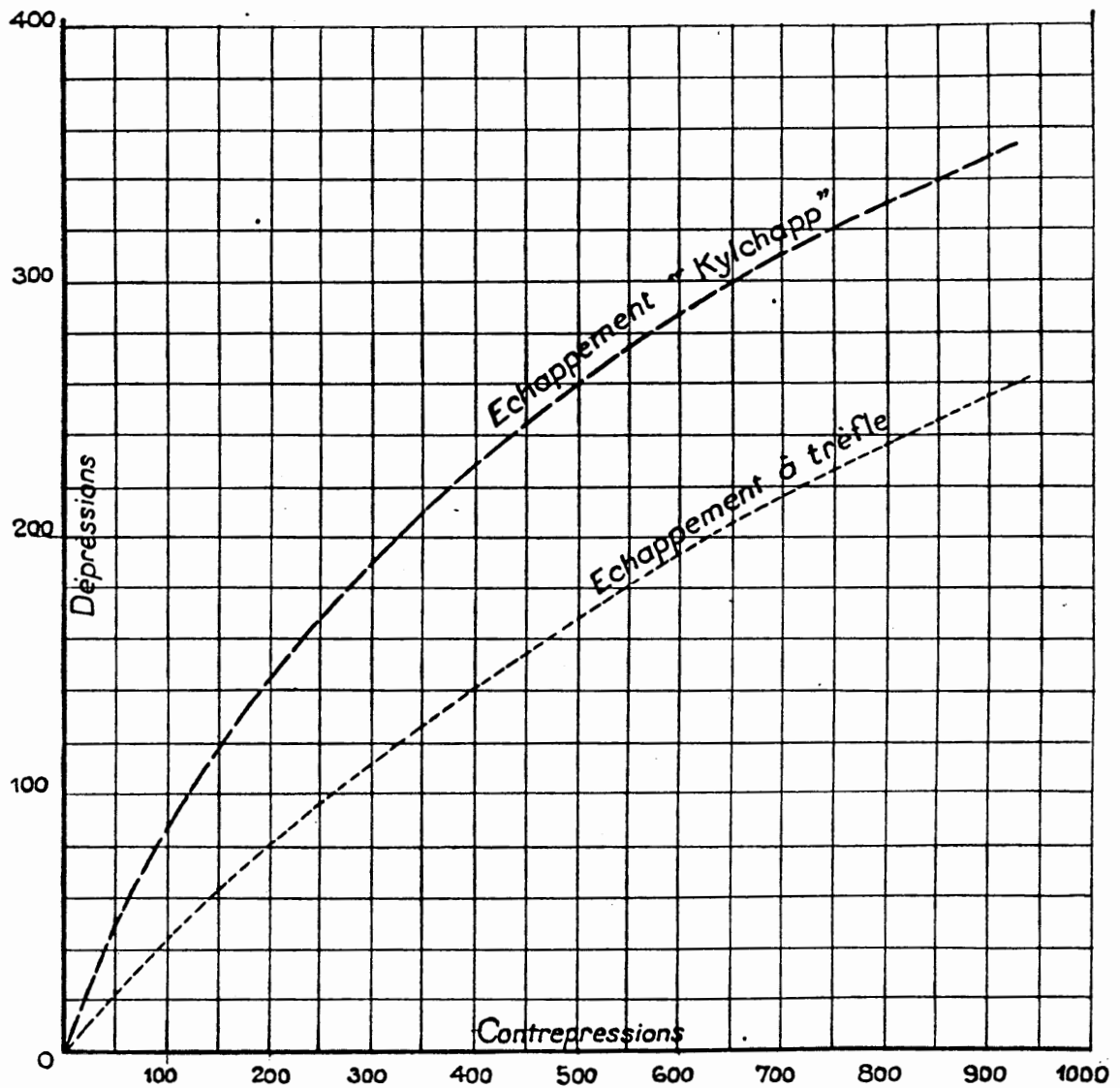


FIG. 166

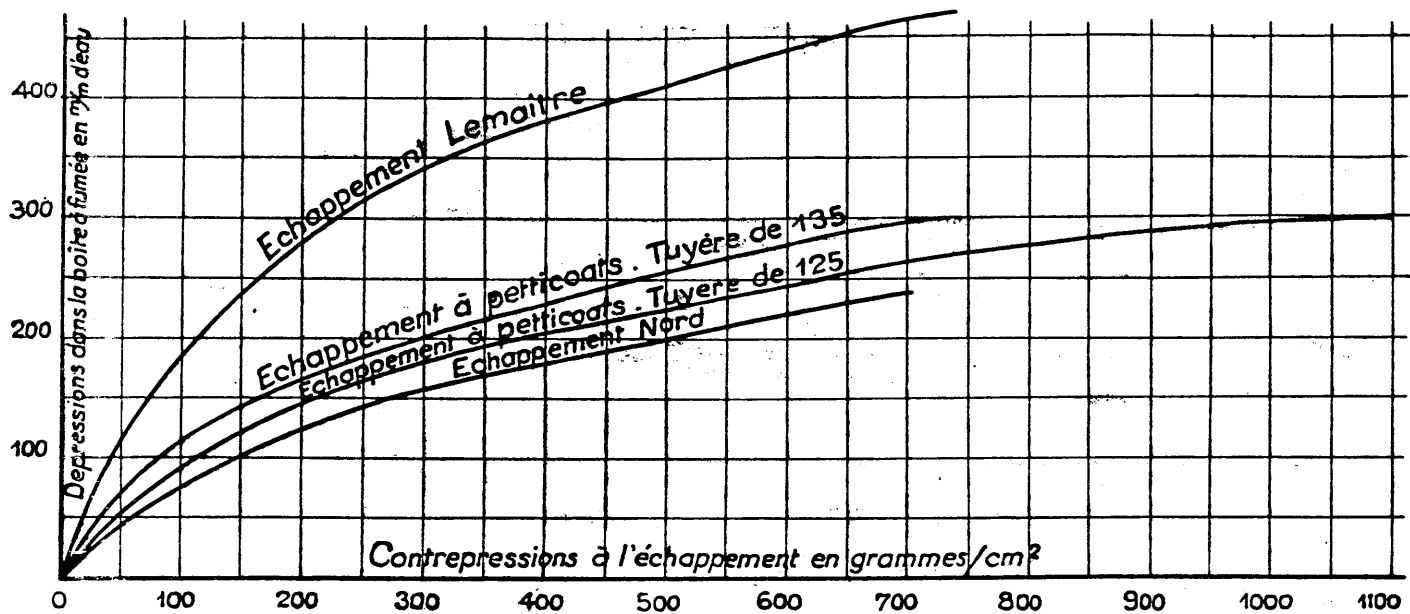


FIG. 167

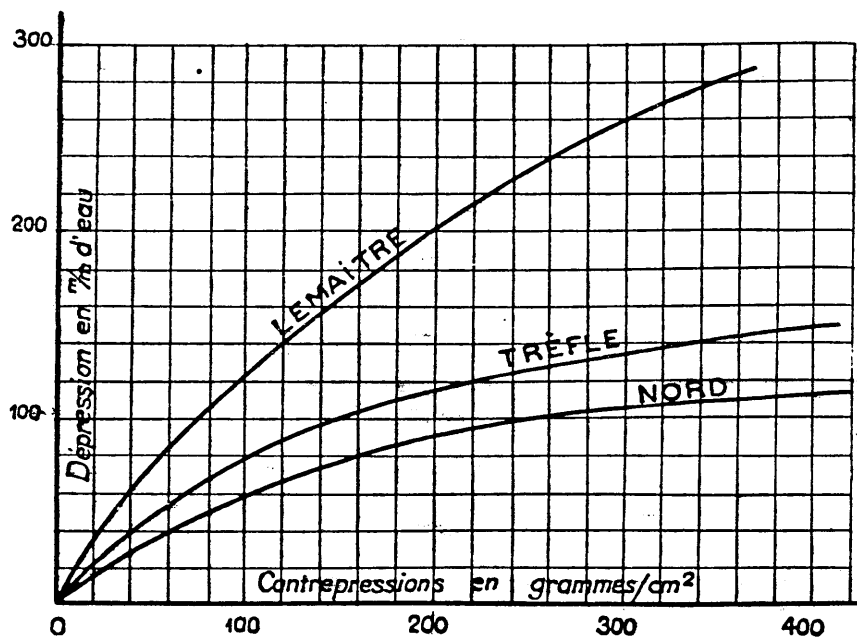


FIG. 168

La figure 166 donne les courbes caractéristiques de deux types d'échappement montés successivement sur la mikado 141 C 112. On voit nettement la supériorité de l'échappement Kylchap qui donne dans la boîte à fumée une dépression de 290 mm. d'eau pour une contrepression aux cylindres de 600 gr/cm² alors qu'avec la même contrepression l'échappement à trèfle donne une dépression de 190 mm.

Les traits forts se rapportent à la locomotive 140 A 1025

Les traits mixtes se rapportent à la locomotive 140 B 1333

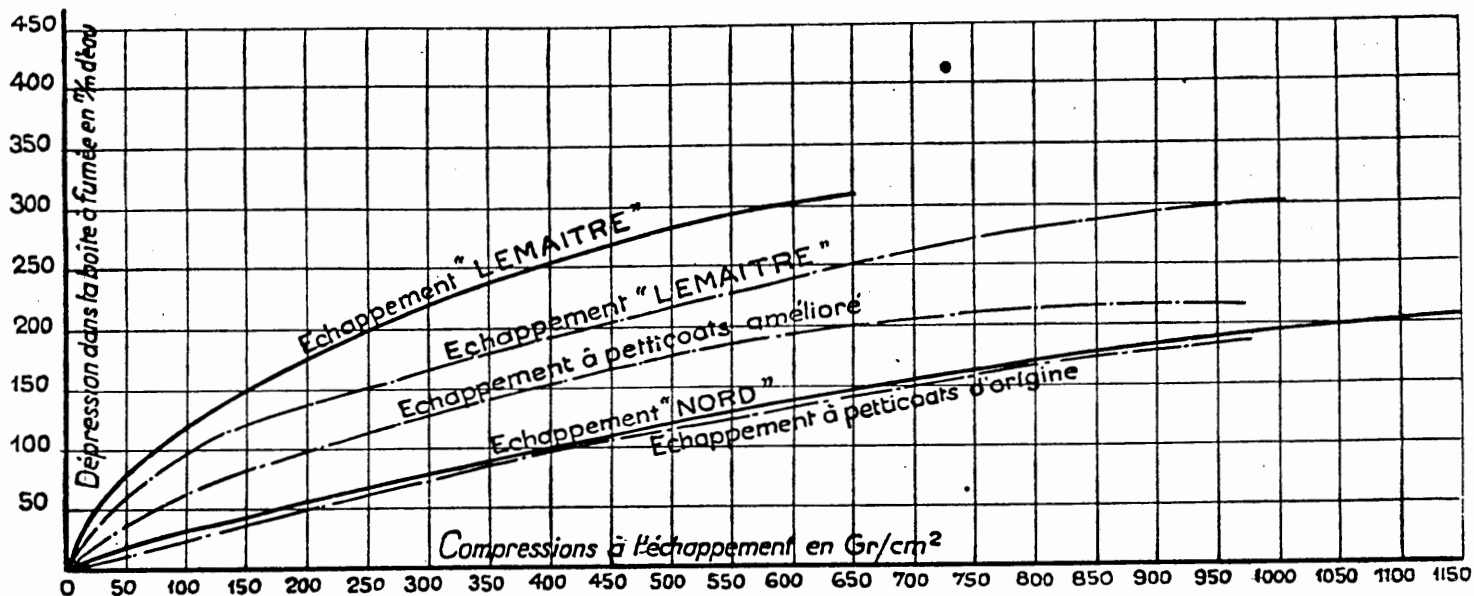


FIG. 169

Sur la machine 230 D 194 la comparaison des échappements Nord, à petticoats et Lemaître est nettement à l'avantage du dernier qui double à peu près la dépression dans la boîte à fumée pour une contrepression donnée (fig. 167).

De même, sur les machines 140 C (fig. 168) et sur les machines 140 B (fig. 169) l'échappement Lemaître surclasse les anciens échappements Nord, trèfle ou à petticoats (1).

La supériorité des échappements modernes (Kylchap, Lemaître, etc., n'est plus discutée).

(1) Voir étude de M. Chapelon (n° août et sept. 1928 de la Revue Générale des Ch. de fer) sur les conditions de fonctionnement de l'échappement, la description des différents types et les résultats obtenus aux essais.