

CHAPITRE IV

**CORPS CYLINDRIQUE, TUBES A FUMÉE**

Le corps cylindrique est la partie de la chaudière où se fait la vaporisation sous l'action des gaz chauds issus du foyer. Ces gaz chauds traversent les tubes à fumée entourés de la masse d'eau située dans le corps cylindrique et y perdent une grande partie de leurs calories.

Liaison du corps cylindrique  
à la boîte à feu Belpaire

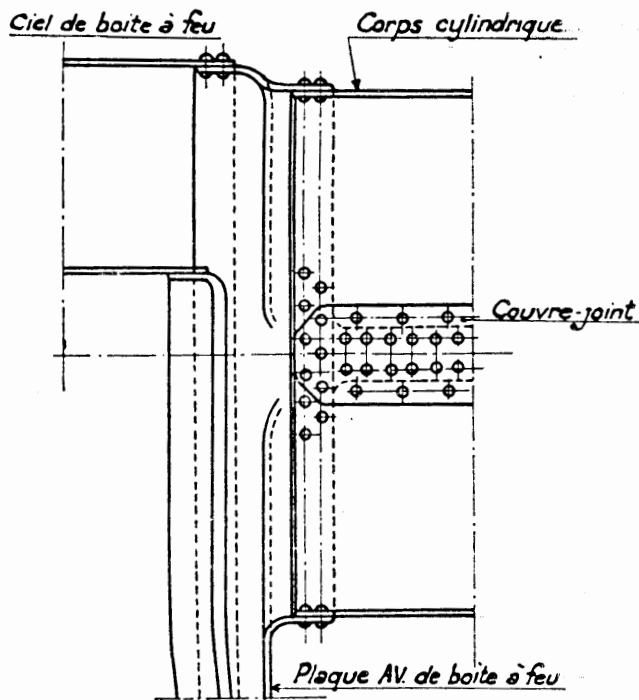


FIGURE 70

Liaison du corps cylindrique  
à la boîte à feu Crampton.

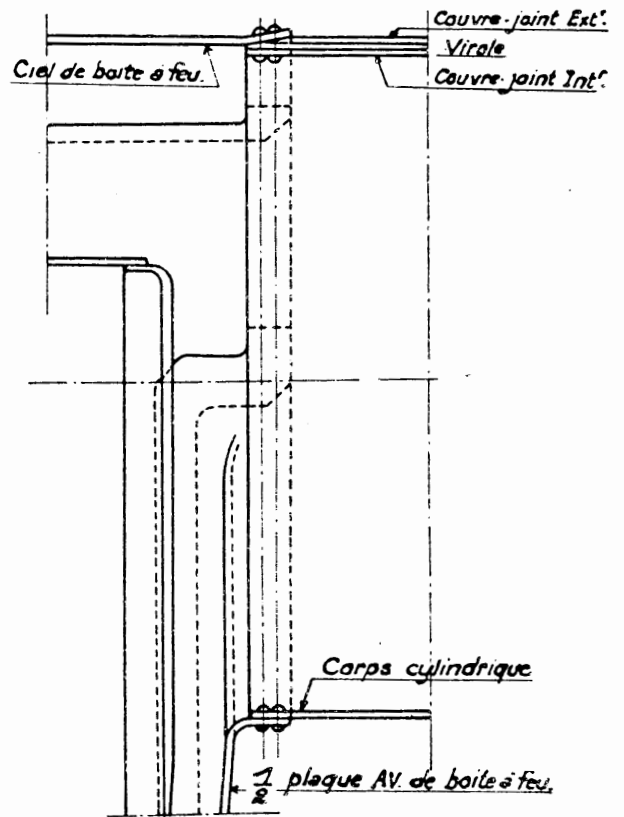


FIGURE 71

## 1<sup>o</sup> Corps cylindrique

Le corps cylindrique a une section circulaire de diamètre allant de 1 à 1 m. 500 suivant les machines; cette forme résiste bien sans armature à la pression intérieure. Il se compose de deux ou trois viroles juxtaposées. L'assemblage de ces viroles entre elles et celui de la virole arrière à la boîte à feu est fait par rivets. On a vu que les boîtes à feu Belpaire ont une plaque avant dont l'embouti est rivé au corps cylindrique (*fig. 70*) tandis que pour les boîtes à feu à berceau cylindrique, c'est le ciel qui est assemblé à la partie supérieure de la virole arrière et la plaque avant à la partie inférieure seulement (*fig. 71*).

### — Assemblage à couvre-joints —

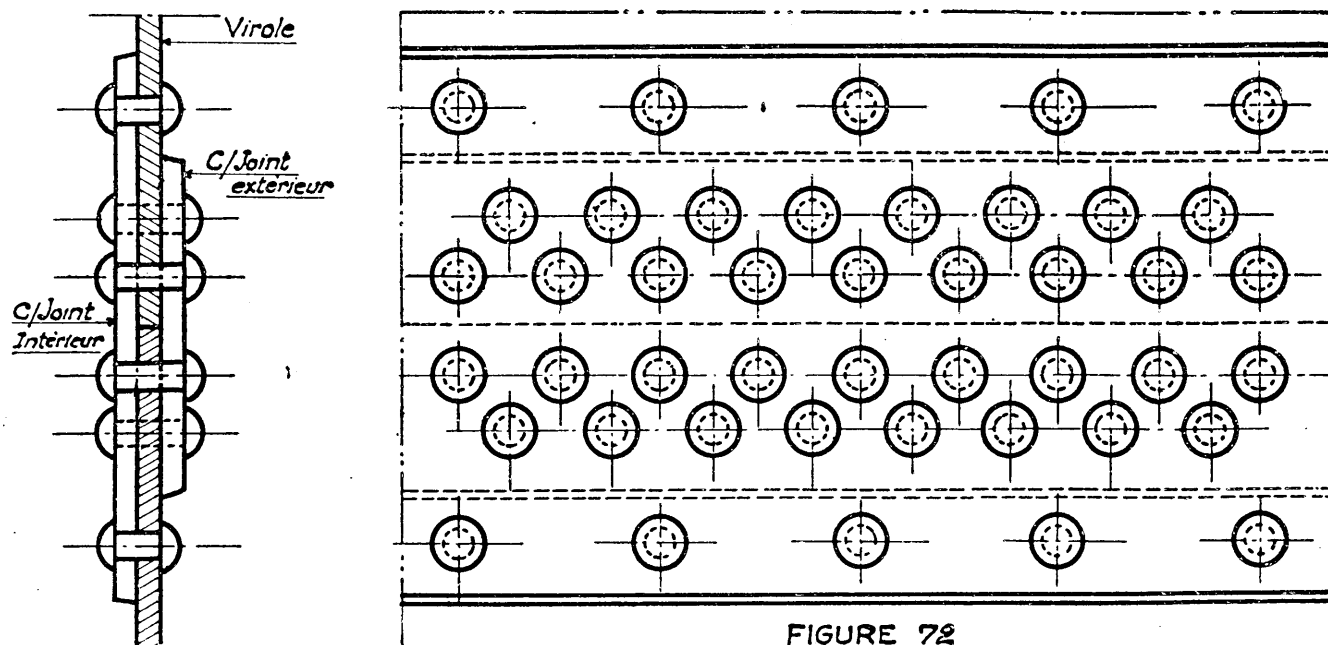


FIGURE 72

Les viroles sont obtenues en cintrant des tôles en acier A ( $R = 35$  à  $40 \text{ kg/mm}^2$ ;  $A \% = 30$  à  $35 \%$ ; teneur en phosphore  $< 0,04 \%$ ; teneur en soufre  $< 0,05 \%$ ; teneur totale en  $P + S < 0,08 \%$ ) dont l'épaisseur varie de 11 à 20 mm. (1) (2). Ces tôles sont courbées dans le sens du laminage qui est le sens présentant la plus grande résistance. Le pression de vapeur donne, en effet, une fatigue deux fois plus grande dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. La fatigue dans le sens transversal (tendance à l'ouverture des viroles) due à une pression de  $P \text{ kg/cm}^2$  sur une virole dont le diamètre intérieur est  $D \text{ mm}$  et l'épaisseur  $e \text{ mm}$  vaut en effet :

$$\frac{PD}{2e} \times \frac{1}{100} \text{ kg/mm}^2.$$

(1) Les viroles des 141 P sont en acier spécial à 2,5 % de nickel ( $R = 50 \text{ kg/mm}^2$   $A \% > 18 \%$ ). L'emploi de cet acier a permis de conserver pour une chaudière timbrée à 20 hpz l'épaisseur de 19 mm. de la chaudière timbrée à 16 hpz. On a ainsi évité un alourdissement de 1100 kg.

(2) Un article de la Revue Générale des Chemins de fer (n° 6 de novembre 1943) a répondu à la question de savoir si le « vieillissement » (altération du métal des tôles au bout de 40 à 50 ans) déjà observé sur certains ouvrages en acier était susceptible de présenter un danger sur les chaudières de locomotives.

Tandis que dans le sens longitudinal (tendance à la séparation des fonds) cette fatigue vaut :

$$\frac{PD}{4e} \times \frac{1}{100} \text{ kg/mm}^2.$$

L'assemblage longitudinal des viroles est fait par une rivure à couvre-joints (fig. 72).

— Rivure à recouvrement dite à "clins" —

(1 Seule rangée de rivets)

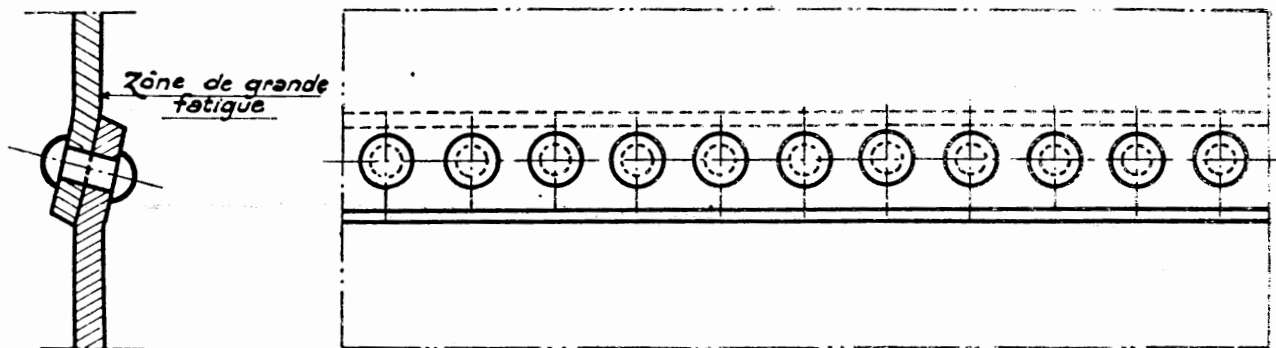


FIGURE 73

— Rivure à recouvrement dite à "clins" —

(2 Rangées de rivets)

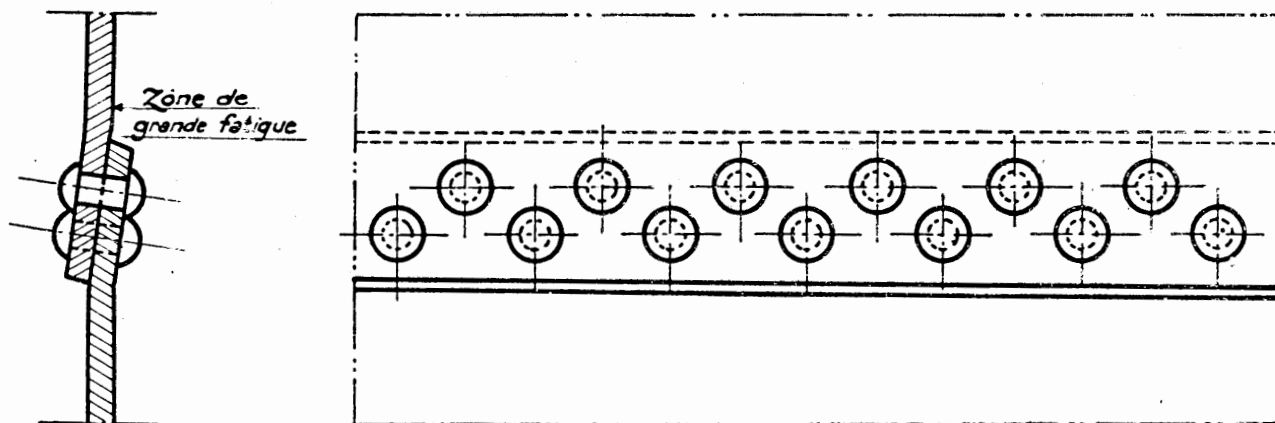


FIGURE 74

Dans les vieilles machines on trouve encore des rivures à recouvrement dites rivures à clins. Ce procédé de rivure a été abandonné parce qu'il faut plier la tôle de façon à faire se superposer les pinces et dans le pli ainsi créé la fatigue de la tôle est augmentée et il se produisait des fissurations (fig. 73 et 74).

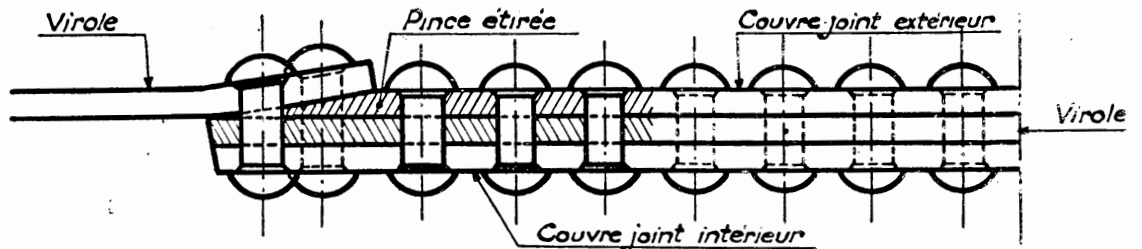
Les assemblages longitudinaux des diverses viroles d'un corps cylindrique ne sont pas dans le prolongement les uns des autres mais décalés sur la circonférence.

L'assemblage des viroles entre elles est fait par rivure double à recouvrement; les deux viroles voisines sont emboîtées l'une dans l'autre et les pinces des joints longitudinaux ou des

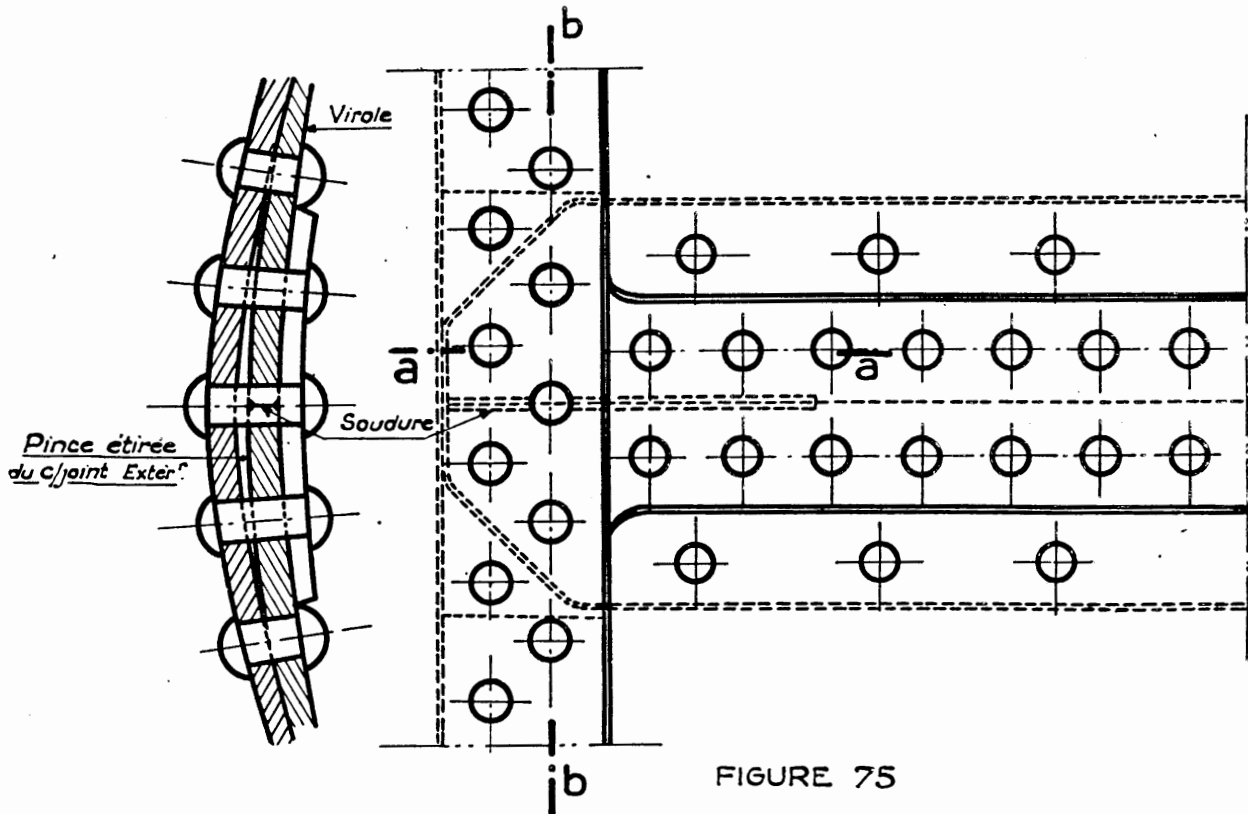
couvre-joints sont amincies et étirées au point de contact de façon que l'emboîtement soit étanche. On soude actuellement les extrémités des joints longitudinaux pour éviter l'étirage des couvre-joints (fig. 75). L'assemblage général des trois viroles d'un corps cylindrique

DISPOSITION DES COUVRE-JOINTS A L'ASSEMBLAGE DE 2 VIROLES

*Coupe suivant aa*



*Coupe suivant bb*



peut être télescopique lorsque les diamètres vont en diminuant ou non télescopique lorsque la virole du milieu recouvre les deux autres ou en est recouverte.

**2° Dôme**

Le dôme est une chambre placée à la partie supérieure d'une des viroles du corps cylindrique. Il est destiné à permettre la captation de la vapeur et renferme par conséquent le régu-

lateur. Pour réduire le plus possible les entrainements d'eau on lui donne d'une part la plus grande hauteur possible et d'autre part on le situe longitudinalement sur la verticale du centre d'oscillation du plan d'eau. Néanmoins, sur les machines modernes il contient un dispositif séparateur d'eau à chicanes (voir chapitre VII, captation de la vapeur).

— DÔME —

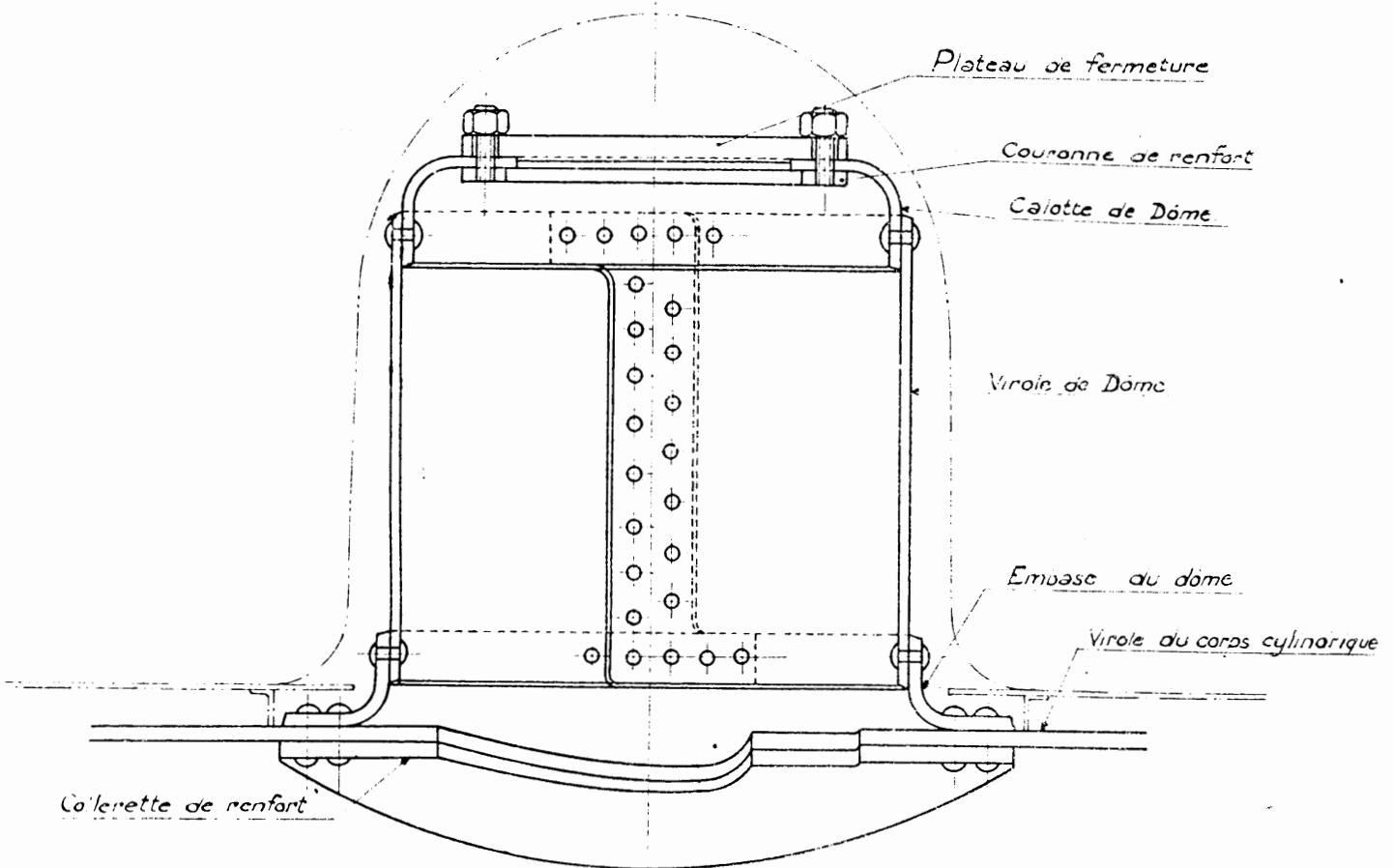


FIGURE 76

Le dôme permet l'accès à l'intérieur du corps cylindrique.

Le dôme est de forme cylindrique à axe vertical fermé à sa partie supérieure par une calotte hémisphérique ou plate raccordée par un embouti arrondi (fig. 76).

Il communique avec la chaudière par une ouverture de dimensions aussi réduites que possible pour ne pas trop affaiblir la virole. On consolide d'ailleurs cette virole par une tôle en forme d'anneau rivée à l'intérieur du corps cylindrique et s'étendant sous toute l'embase du dôme (fig. 76).

Le dôme est constitué par une tôle enroulée dont les extrémités sont assemblées soit par recouvrement avec double rangée de rivets, soit par couvre-joints, soit par soudure (231 C).

La partie inférieure du dôme est fixée au corps cylindrique de chaudière par une embase emboutie ou bien la partie cylindrique du dôme est forgée pour sa fixation directe sur le corps cylindrique.

Le dôme des machines 140 B (ex américaines B) est entièrement embouti (*fig. 77*).

### 3° Tubes à fumée

Les tubes à fumée traversent le corps cylindrique depuis son extrémité arrière déterminée par la plaque tubulaire de foyer jusqu'à son extrémité avant déterminée par la plaque tubulaire de boîte à fumée. On sait que l'idée de ces tubes est due à Marc Seguin qui a pensé ainsi utiliser une partie de la chaleur restant dans les gaz de combustion avant de les laisser s'échapper dans l'atmosphère par la cheminée.

L'emploi des tubes à fumée permet une réduction de poids pour une surface de chauffe donnée ou un accroissement de la surface de chauffe pour un poids donné. L'épaisseur des tubes est de 3 à 5 mm., tandis que celle des parois d'une chaudière est comprise entre 8 et 15 mm.; donc une surface de chauffe tubulaire pèse trois fois moins environ que la même surface appartenant à la chaudière. De même le volume occupé par un faisceau tubulaire

#### — DÔME EMBOUTI DES LOCOMOTIVES 140 B —

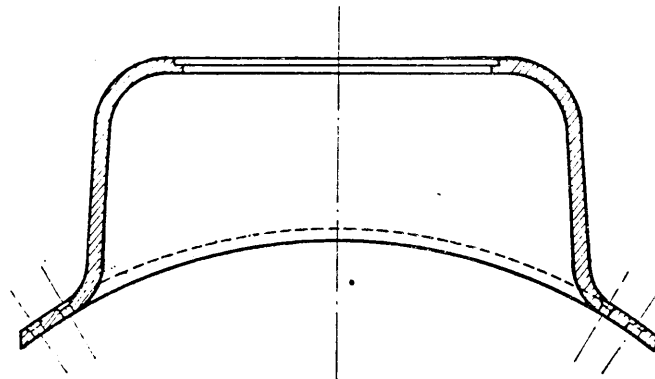


FIGURE 77

dont la surface de chauffe est donnée est inférieur à celui d'un seul corps cylindrique de même surface de chauffe et il est d'autant plus réduit que le diamètre des tubes employés est plus petit. Mais on est limité dans la réduction de ce diamètre par la résistance opposée au passage des gaz et par l'encrassement des petits tubes par la suie.

#### a) Dimensions du faisceau tubulaire.

Il y a intérêt à déterminer la longueur des tubes, leur section et leur nombre, de façon que les gaz aient perdu le plus de chaleur possible lorsqu'ils arrivent dans la boîte à fumée,

c'est-à-dire de façon que leur température soit la plus basse possible lorsqu'ils sortent de faisceau tubulaire (1).

(1) On peut se rendre compte de la longueur à donner aux tubes en analysant ce qui se passe dans le faisceau.

La chaleur passe des gaz à l'eau avec une intensité qui dépend en chaque élément de tube de la différence de température, de la vitesse des gaz et de leur poids spécifique. Le coefficient de transmission de la chaleur à travers les tubes; c'est-à-dire le nombre de calories passant par seconde à travers une unité de surface des tubes par degré de différence de température, est donné par la formule de Nicholson :

$$H = K \gamma V$$

où K est une constante physique,  $\gamma$  le poids spécifique des gaz et V leur vitesse.

Si  $\theta$  est la température de l'eau dans la chaudière, T celle des gaz en un point donné du faisceau tubulaire, la quantité de chaleur qui passe par seconde à travers un élément de surface ds est :

$$H (T - \theta) ds = K \gamma V (T - \theta) ds$$

Si M est la masse de gaz produite par seconde, cp leur chaleur spécifique à pression constante, la quantité de chaleur cédée par les gaz en un point où leur température est T et baisse de dT est :

$$M cp dT$$

On doit donc avoir :

$$- M cp dT = K \gamma V (T - \theta) ds$$

Si  $T_e$  est la température des gaz à la sortie du faisceau tubulaire et  $T_b$  à l'entrée on a, en intégrant et en supposant cp constant:

$$T_e - \theta = (T_b - \theta) e^{-\frac{K \gamma V}{M cp} S}$$

e = 2,718 étant la base des logarithmes népériens

$$\text{Or, } M = n V \frac{\pi d^2}{4} \gamma$$

$$S = n \pi d l$$

(n étant le nombre de tubes, d leur diamètre, l leur longueur).

L'exposant de e peut s'écrire :

$$- 4 \frac{K}{cp} \frac{l}{d}$$

$T_e$  diminue donc suivant une loi exponentielle lorsque  $\frac{l}{d}$  augmente. Par conséquent, au delà d'une certaine valeur de  $\frac{l}{d}$ ,  $T_e$  ne croît presque plus; un-allongement excessif rendant le tirage difficile donnerait peu de résultat.

La valeur de K se déduit, pour une allure de chargement donnée, de la courbe de variation de la température T des gaz le long du faisceau tubulaire.

On a trouvé par exemple :

$$\frac{K}{cp} = 0,00413$$

Or, la chaleur spécifique des gaz entre 300 et 1000° est environ :

$$cp = 0,3$$

$$K = 0,0014$$

ce qui donne :

La quantité de chaleur cédée par seconde par les gaz dans le faisceau est :

$$Q = M cp (T_b - T_e) = M cp (T_b - \theta) \left( 1 - e^{-0,125 \frac{l}{d}} \right)$$

Cette relation montre que Q est indépendant de n. Ce résultat a été confirmé par l'expérience; on a pu boucher la moitié des tubes d'une machine sans changer le rendement calorifique de sa chaudière.

C'est sur le tirage qu'influe n. En effet, la perte de charge des gaz dans le faisceau peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta h = (a + b \frac{1}{d}) \frac{V^2}{2g}$$

a et b étant des constantes.

Or :

$$V = \frac{1}{n \frac{\pi d^2}{4}} \times \frac{M}{\gamma}$$

$\Delta h$  est donc inversement proportionnel au carré de la section du faisceau ou pour d donné au carré du nombre de tubes.

En définitive, en écrivant M et Q en fonction de  $\Delta h$  et de  $\frac{1}{d}$  on peut calculer le maximum de Q pour une dépression  $\Delta h$  donnée et pour chaque type de tube défini par son diamètre réel ou équivalent (tube Serve) en annulant la dérivée de Q par rapport à  $\frac{1}{d}$ . La valeur de  $\frac{1}{d}$  trouvée est environ 100, elle est celle de la plupart des machines.

(D'après *La locomotive à vapeur*, de A. Chapelon).

Le renvoi (1) expose la théorie mathématique de l'échange de chaleur à travers le faisceau tubulaire. Nous ne donnerons dans le texte qui suit que les résultats théoriques et ceux de l'expérience qui servent de base à la détermination des dimensions du faisceau tubulaire.

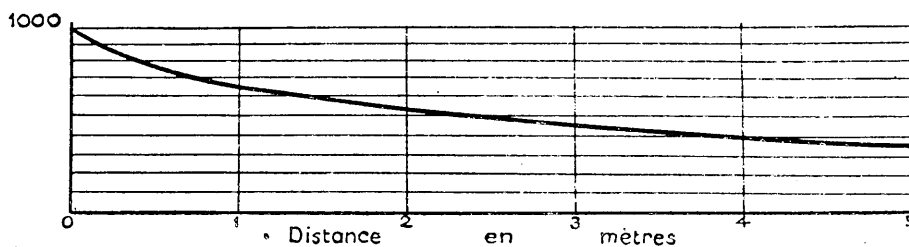


FIG. 77 bis

En 1890, Henry, ingénieur en chef au P.-L.-M. entreprit des essais sur une chaudière dont le corps cylindrique était formé de viroles démontables de façon à faire varier à volonté

— COUPE D'UN TUBE "SERVE" —

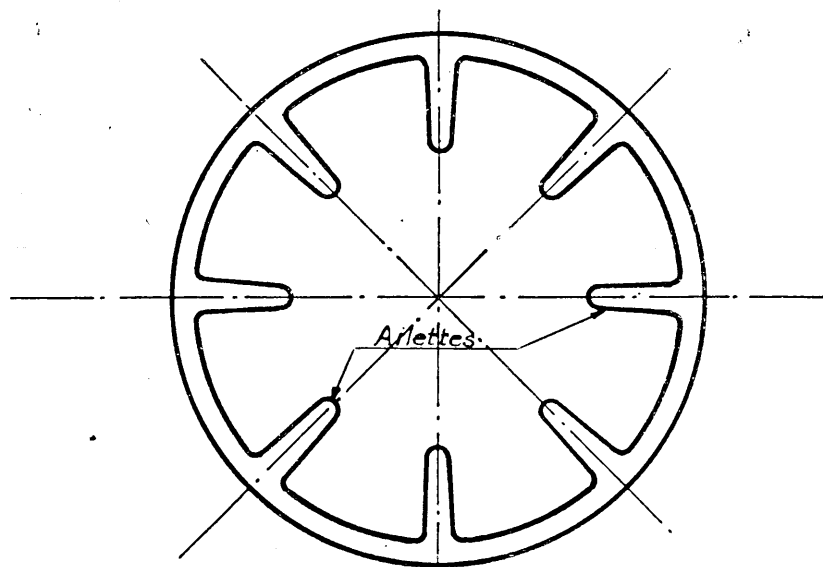


FIGURE 78

la longueur des tubes. Il fut constaté que pour un tirage donné (dépression constante dans la boîte à fumée) la quantité d'eau vaporisée par kg. de charbon s'accroissait très rapidement jusqu'à une longueur des tubes comprise entre 4 m. 50 et 5 m. puis ensuite beaucoup plus lentement.



L'absorption de chaleur par la surface de chauffe indirecte était donc surtout importante dans les 4 à 5 premiers mètres du faisceau, ce que confirmait l'abaissement particulièrement rapide de la température des gaz au début de leur trajet (*fig. 77 bis*).

L'absorption par Si est aussi d'autant plus grande que le diamètre des tubes est plus petit. En effet, si par exemple pour une même section de passage on emploie des tubes de diamètre deux fois plus petits, il faudra quatre fois plus de tubes et leur périmètre total proportionnel à la surface de chauffe des parois sera deux fois plus grand.

En définitive, l'absorption de chaleur du faisceau augmente donc avec le rapport  $\frac{l}{d}$ .

DISPOSITION DES TUBES DANS  
LES ALVÉOLES

*En Rangées verticales*

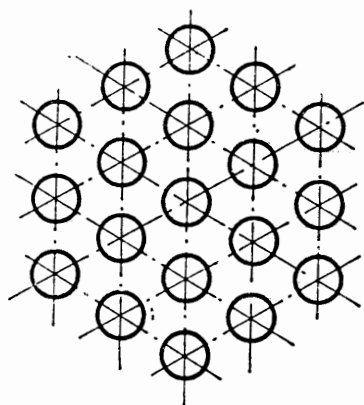


FIGURE 79

*En Rangées horizontales*

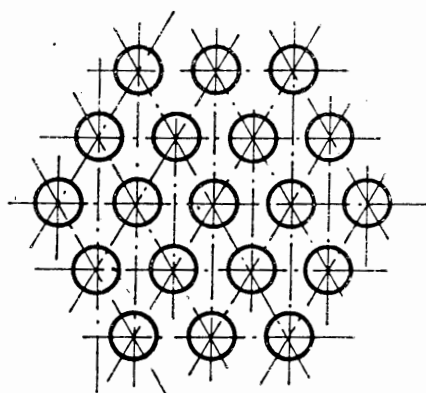


FIGURE 80

Les expériences de Henry ont montré que pour une dépression  $h$  dans la boîte à fumée le rapport optimum  $\frac{l}{d}$  correspondant à la production maximum de la chaudière a lieu pour  $\frac{l}{d} = 100$  environ (avec les échappements modernes qui permettent de relever  $h$  sans trop nuire au rendement moteur  $\frac{l}{d}$  peut atteindre 120 à 130).

Ceci explique que pour certaines chaudières modernes plus puissantes et plus longues on a cherché à ne pas dépasser 6 m. de longueur de tube et qu'on a été conduit à adopter une chambre de combustion.

Par ailleurs, la section totale de passage des gaz par le faisceau doit être aussi élevée que possible pour avoir un tirage économique. On placera donc le maximum de tubes du diamètre optimum déterminé par les considérations ci-dessus, en veillant cependant à ménager entre ces tubes un intervalle suffisant (15 à 25 mm.) pour ne pas gêner le dégagement des bulles de vapeur.

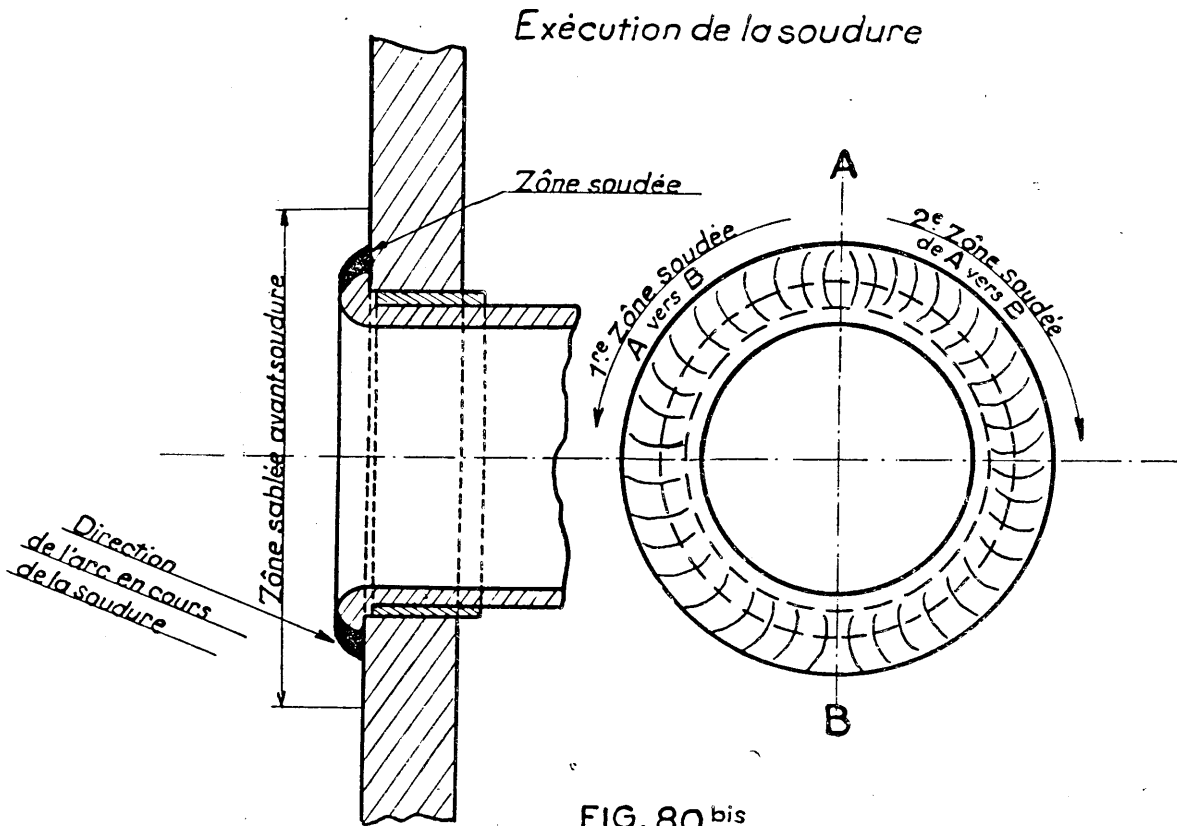
**b) Description des différents types de tubes.**

Les tubes à fumée qui étaient autrefois en laiton sont maintenant en acier doux soudés par recouvrement ou plus souvent étirés sans soudure. On distingue les tubes à fumée dits petits tubes, les tubes à surchauffe dits gros tubes et les tubes Serve,

Les petits tubes sont des tubes lisses de diamètres extérieurs : 11,5, 11,5, 17,5, 51, 51, 57, 60, 63,5, 70 mm. selon le type de machines.

Les tubes à surchauffe sont des tubes lisses plus gros (133, 143, 152 mm.) qui contiennent les éléments surchauffeurs.

Remarquons ici que le problème de la détermination des dimensions du faisceau tubulaire se complique dans le cas d'application de la surchauffe. La section totale de passage des gaz doit être répartie judicieusement entre les gros et petits tubes pour obtenir une température de surchauffe donnée. Les gaz ne se partagent d'ailleurs pas dans le même rapport que celui de la section des gros aux petits tubes.



Le tube Serve (*fig. 78*) est un tube de 65 ou 70 mm. de diamètre qui possède des ailettes intérieures afin d'augmenter les surfaces en contact avec les gaz chauds (80 % environ). A diamètre égal il absorbe sensiblement deux fois plus de chaleur qu'un tube lisse et dans le cas de son emploi la valeur optimum du rapport  $\frac{l}{d}$  serait de 50. D'où, son utilisation pour des chaudières courtes de préférence à des tubes lisses de diamètre très réduit qui seraient facilement obstrués par les escarbilles. Ce tube est très rigide et on est obligé de le munir à chaque bout de manchons lisses de 450 mm. environ afin qu'il ait un peu de flexibilité et que sa dilatation n'entraîne pas de déformations importantes des plaques tubulaires. Il s'encrasse assez facilement et les dépôts de suie gênent le tirage.

On a essayé des tubes composés de tronçons successifs tantôt lisses, tantôt à ailettes et des tubes à rainures hélicoïdales qui auraient l'avantage de créer sur toute leur longueur des mouvements tourbillonnaires favorables à la transmission de la chaleur et au nettoyage du tube par les parcelles de combustible entraînées,

Les tubes subissent des essais à froid avant leur mise en place : épreuve hydraulique intérieure à 25 hpz et une épreuve à la flexion pour le raboutage ; les gros tubes subissent en plus une épreuve extérieure.

- PLAQUE TUBULAIRE DE BOÎTE À FUMÉE -

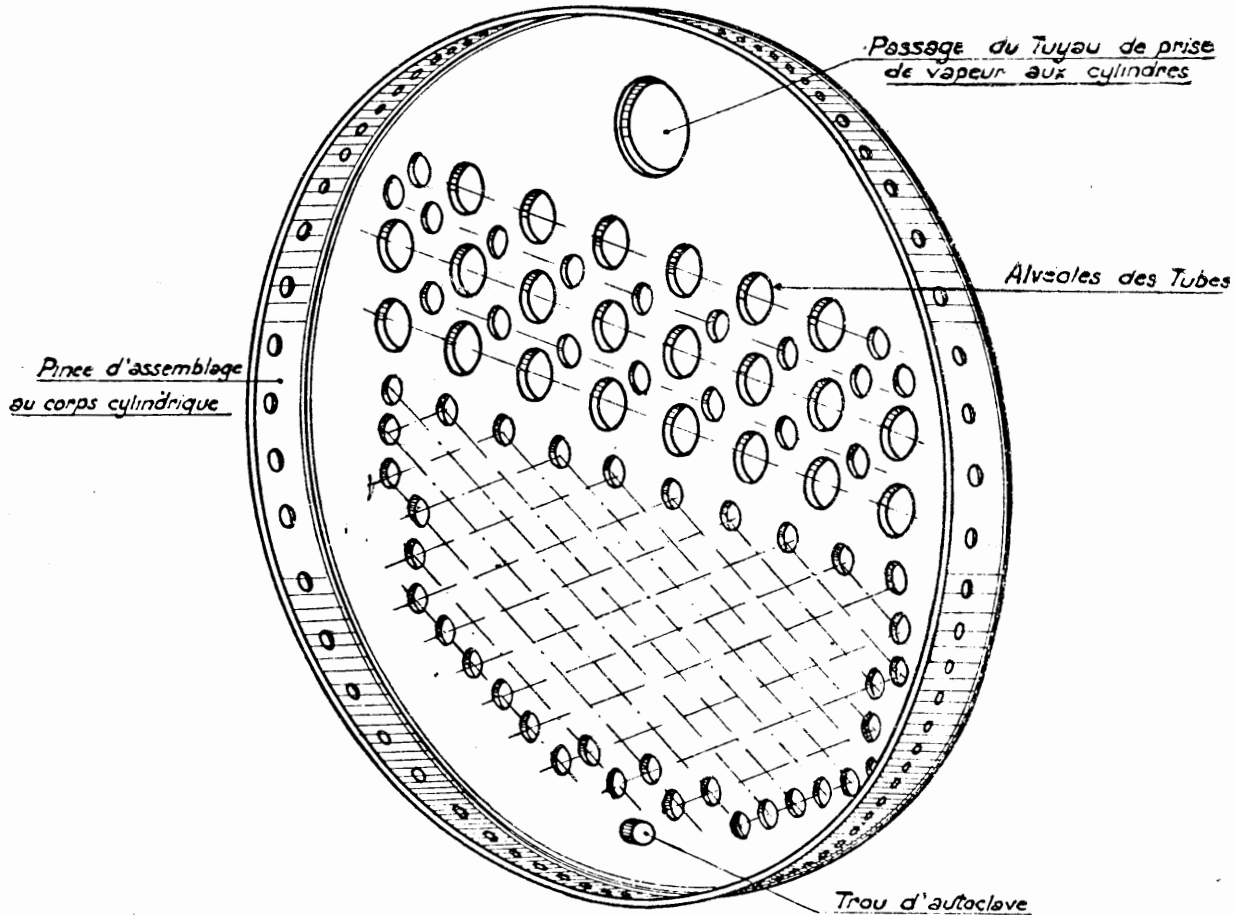


FIGURE 81

Les tubes peuvent être disposés en rangées verticales ou horizontales et dans les deux cas en quinconce. Dans le premier cas le losange formé par quatre tubes voisins à son petit axe vertical (*fig. 79*) dans le deuxième cas ce losange a son petit axe horizontal (*fig. 80*). La première disposition permet un dégagement de vapeur plus facile mais ne permet pas de loger un aussi grand nombre de tubes pour une même surface que la seconde disposition.

Les tubes sont rétreints du côté foyer de 8 à 10 mm. sur le diamètre pour les petits tubes et de 25 mm. environ pour les gros tubes lorsqu'ils sont montés sur une plaque tubulaire neuve. Ils sont évasés du côté boîte à fumée de 4 mm. sur le diamètre. Cette disposition permet de faire sortir les tubes par l'avant au cours des démontages auxquels s'oppose le dépôt de tartre entourant le tube après un service prolongé. Les alvéoles des tubes à fumée sont à

l'origine cylindrique pour les plaques tubulaires en acier et conique (conicité 5 %) pour les plaques en cuivre. Les alvéoles des tubes surchauffeurs sont cylindriques.

Les tubes sont montés avec un jeu de 0,5 mm. (petits tubes) ou 1 mm. (gros tube) dans les alvéoles et ce jeu est supprimé par le sertissage. Dans les alvéoles de plaque de foyer en acier on interpose pour faire joint une bague en cuivre de 1,5 mm. d'épaisseur (petits tubes) ou 3 mm. d'épaisseur (gros tubes) entre le tube et la plaque. Les bouts des gros tubes sont, en outre, cannelés extérieurement dans le cas de montage sur plaque tubulaire en cuivre. Après sertissage l'extrémité côté foyer est bordée puis soudée électriquement à la plaque tubulaire si elle est en acier (*fig. 80 bis*). Si les alvéoles de plaque tubulaire ont dû être réalisées

Assemblage de la plaque tubulaire dans boîte à fumée débordante

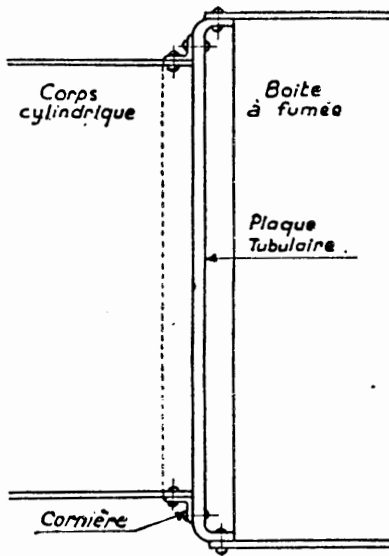


FIGURE 82

Armature de la plaque tubulaire

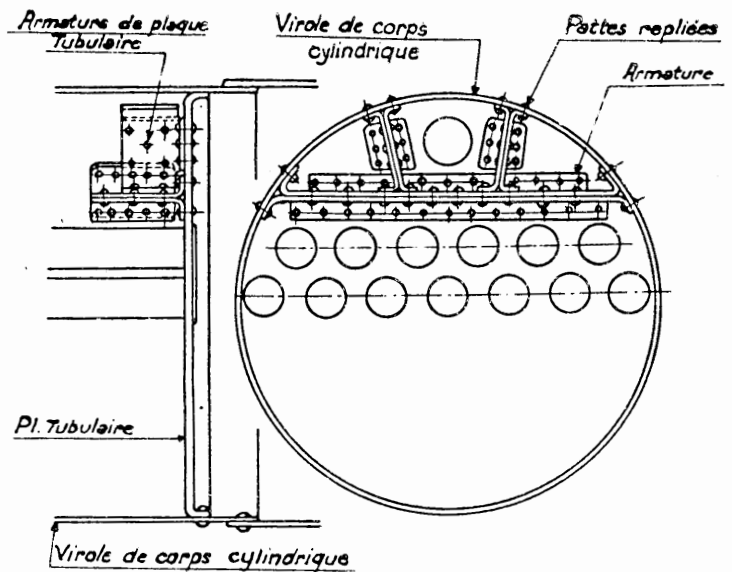


FIGURE 83

par suite de l'ovalisation produite en service, on interpose une bague en cuivre qui rattrape la différence de diamètre aussi bien dans les plaques en cuivre que dans celles en acier. Si l'agrandissement du diamètre des alvéoles est de plus de 3 mm. pour les petits alvéoles et de plus de 5 mm. pour les gros, on utilise des tubes rétreints à une cote d'entretien normalisée.

**4° Plaque tubulaire de boîte à fumée**

Cette plaque est la cloison avant du corps cylindrique. Elle est traversée par les tubes à fumée et parfois par le tuyau de prise de vapeur allant aux cylindres.

Elle est généralement constituée par une plaque circulaire en tôle d'acier doux emboutie, de 20 ou 25 mm. d'épaisseur (*fig. 81*). Elle est rivée à la première virole du corps cylindrique par son bord rabattu dirigé vers l'avant qui a été au préalable usiné au tour.

On voit que les plaques tubulaires de boîtes à fumée sont beaucoup plus épaisses que les plaques tubulaires de foyer en acier, bien que la fatigue à supporter par les surfaces percées d'alvéoles et non armaturées soit de même grandeur pour les deux plaques. On fait donc travailler ces plaques à un taux de fatigue bien plus faible que les plaques de foyer. Nous avons vu que l'épaisseur des parois du foyer est limitée pour favoriser la transmission de chaleur. Cette raison n'existe pas pour les plaques tubulaires de boîte à fumée et on peut ainsi adopter des plaques rigides ne subissant aucune déformation appréciable sous l'effet de la pression. En outre, les plaques épaisses peuvent être maintenues en service aux G.R. malgré les usures produites par les corrosions dans la partie inférieure que l'on recharge par soudure; les frais d'entretien sont ainsi diminués. C'est pourquoi les plaques tubulaires de boîte à fumée de machines américaines (140 B) qui avaient 13 mm. d'épaisseur à l'origine, ont été remplacées par des plaques de 20 mm. d'épaisseur.

Les tubes agissent comme des tirants pour empêcher la séparation des deux plaques tubulaires mais ils commencent par les pousser parce qu'ils se dilatent plus que la tôle du corps cylindrique étant portés à une température légèrement plus élevée. Si la tôle résiste les tubes fléchissent. Pour tenir compte de ce que les tubes surchauffeurs sont plus rigides que les petits on les a sur les 141 P éloignés du bord de la plaque tubulaire en plaçant à la partie supérieure une rangée de petits tubes.

Dans certains cas la plaque tubulaire fait saillie sur le corps cylindrique auquel elle est assemblée par une cornière circulaire et elle s'assemble à la boîte à fumée par son bord rabattu (*fig. 82*).

Sur quelques machines anciennes (030-C) la plaque tubulaire de boîte à fumée est plane et assemblée par cornières circulaires au corps cylindrique et à la boîte à fumée.

La partie supérieure de la plaque située au-dessus des alvéoles est maintenue rigide soit par des tirants, soit par un assemblage en tôles et cornières. Avec des tirants obliques la plaque est attachée à la première virole (machines américaines); avec des tirants longitudinaux traversant tout le corps cylindrique et passant au-dessus du ciel de foyer, la plaque est reliée à la partie supérieure de la plaque arrière de boîte à feu. C'est l'emploi de tôles et cornières qui est le plus généralement adopté. Le renfort est rivé à la plaque tubulaire et à la première virole; les efforts qu'il transmet à la virole sont assez importants et il faut employer des doubles tôles fixées à la virole par deux pattes repliées et une double rangée de 4 à 5 rivets, car avec une seule rangée l'effort plus concentré créerait une fatigue locale exagérée (*fig. 83*).

